

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**THÈSE PRÉSENTÉE À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI COMME
EXIGENCE PARTIELLE DU DOCTORAT EN RESSOURCES MINÉRALES**

PAR

ERIC LAMONTAGNE

**ÉTUDE HYDROMÉCANIQUE D'UNE FRACTURE EN CISAILLEMENT SOUS
CONTRAINTÉ NORMALE CONSTANTE**

15 MAI 2001



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

À

MARIKJE

CETTE THÈSE EST DÉDIÉE

RÉSUMÉ

Cette étude présente les travaux expérimentaux sur le comportement hydromécanique d'une fracture en cisaillement sous des conditions de contrainte normale constante qui ont permis de caractériser sa transmissivité hydraulique intrinsèque en fonction de l'anisotropie directionnelle de la morphologie de la rugosité des surfaces de la fracture. Les essais ont été réalisés sur des répliques en mortier d'une fracture naturelle de façon à maintenir la même morphologie des surfaces à chaque essai. Le programme d'essais comprenait le cisaillement des répliques de la fracture dans quatre directions et à quatre niveaux de contrainte normale. Chaque essai se composait de plusieurs pas de cisaillement entre lesquels des injections ont été effectuées à des débits différents.

Les résultats de ces essais montrent que:

- pour l'ensemble des essais, la transmissivité intrinsèque globale est comprise dans une zone enveloppe d'environ un ordre de grandeur. Les courbes de transmissivité à l'intérieur de cette zone enveloppe ont la particularité d'augmenter d'environ deux ordres de grandeur durant le premier millimètre de déplacement tangentiel et, par la suite de se stabiliser rapidement;
- la dilatance la plus élevée ne correspond pas nécessairement à la transmissivité intrinsèque la plus élevée et, par conséquent, le comportement de la transmissivité intrinsèque n'est pas directement proportionnelle à la dilatance d'une fracture durant son cisaillement;
- après la résistance de cisaillement au pic, l'écart est de plus en plus marqué entre les courbes des transmissivités intrinsèques à différents débits;
- à partir de la résistance de cisaillement au pic et du début de la dégradation des aspérités, une anisotropie directionnelle de l'écoulement se développe démontrant la plus forte transmissivité orientée perpendiculairement à la direction du cisaillement;
- l'anisotropie ne se développe pas également dans les deux sens de la direction perpendiculaire au cisaillement.

Dans le but de caractériser la dynamique de l'écoulement dans la fracture, des analyses statistiques de la morphologie des surfaces et des moulages des vides ont été effectuées avant et après cisaillement.

Une analyse statistique des hauteurs des aspérités, à l'échelle globale des surfaces de la fracture, a permis de caractériser la morphologie de la fracture et de mettre en évidence l'existence d'une structure morphologique de grandes dimensions à laquelle se superpose des aspérités plus petites de dimensions variables. Cette structure de grande dimension engendre un palier plus élevé occupant un peu plus de la moitié de la surface de la fracture.

L'étude de la morphologie des surfaces de la fracture effectuée à l'aide des variogrammes moyens des hauteurs des aspérités par direction avant cisaillement, démontre la présence de deux familles de structures emboîtées (28 et 15 mm). Cette même étude effectuée après cisaillement démontre que la dégradation des aspérités est associée à la diminution de la transmissivité intrinsèque de la fracture.

Finalement, le moulage des vides, lors des essais de cisaillement, a permis de vérifier l'évolution des contacts avec l'augmentation du déplacement en cisaillement et de visualiser la chenalisation de l'écoulement durant le cisaillement de la fracture.

Mots-clés : Fracture, écoulement, anisotropie, hydraulique, mécanique, hydromécanique, milieux fracturés, laboratoire, morphologie, moulages, vides, géostatistique.

ABSTRACT

This research study deals with the effects of shear direction and injection flow rate on the flow directional anisotropy for a given normal stress. It presents experimental works on hydromechanical shear behaviour of a fracture under constant normal stress conditions that permits the characterisation of the intrinsic hydraulic transmissivity in relation with the directional anisotropy of the roughness morphology on the fracture surfaces. Tests were performed on mortar replicas of a natural fracture so that the fracture roughness and void space geometry were kept the same for each test. The experimental work program was performed through direct shear tests on the fracture replicas in four shear directions under four constant normal stress levels. The application of the normal stress was followed by several injections of fluid under constant flow rate. Then, for each defined shear displacement, several injections of fluid were done at different flow rate but under constant flow rate.

The test results show that:

- for the whole shear tests, the global intrinsic transmissivity is included within an enveloping zone of about one order of size. The transmissivity curves within the enveloping zone has a particularity to increase about two orders of size in the first millimetre of shear displacement and subsequently stabilised rapidly;
- the highest dilatancy do not correspond necessarily with the highest intrinsic transmissivity so that, the behaviour of the global intrinsic transmissivity is not directly proportional to the fracture dilatancy during shear;
- after the peak shear stress, the divergence is more marked between the global intrinsic transmissivity curves at various flow rate;
- after peak shear strength and the beginning of asperity degradation, the gradual passage to residual friction shear behaviour causes a directional flow anisotropy and a reorientation of the flow chenalisation direction sub perpendicularly to the shear direction;

- the anisotropy is not to develop equally between the two sense in the perpendicular direction to shear direction.

In order to characterise the dynamics of the flow pattern in the fracture, a statistical analysis of the surfaces morphology of the fracture and the casting of void space geometry were performed before and after shear.

A statistical analysis of asperity heights, on the global scale of the fracture surfaces, permits to characterise the fracture morphology and put in evidence a large morphological structure on which are superposed smaller asperities of variable dimensions. This large dimension structure generate a higher level landing occupying more than half of the fracture area.

The study of the surfaces morphology of the fracture, performed with the geostatistical mean asperity heights variogram by direction before shearing, show the presence of two entangled morphologic structure families (28 and 15 mm). This same study done after shearing shows that the asperity degradation seems associated with the reduction of the global intrinsic transmissivity of the fracture.

Finally, the void spaces morphology evaluated by casting techniques, during the shear tests, has permitted to verify the contacts evolution with the increasing shear displacement and visualised flow chenalisation during fracture shearing.

KEYWORDS

Fracture, flow pattern, fluid flow, anisotropy, hydraulic, mechanical, hydromechanical, laboratory tests, morphology, void space geometry, casting, geostatistic.

REMERCIEMENTS

Condenser en quelques paragraphes toute la gratitude que j'éprouve à l'endroit de ceux et celles qui m'ont permis de mener à terme ce projet n'est pas une mince tâche. Toutefois, il s'agit là de remplir un devoir ô combien agréable!

Les travaux de laboratoire sur lesquels repose cette thèse ont été menés au BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) à Orléans sous la responsabilité scientifique de Mme Sylvie Gentier. Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'Université de Bordeaux I, le BRGM et l'Université du Québec à Chicoutimi.

Le financement de ces travaux a été rendu possible par l'entremise des organismes ou fonds de recherches suivants : Le BRGM, la bourse du FCAR (Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche), la bourse d'encouragement à la mobilité du FCAR, la bourse de la FUQAC (Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi), la bourse de stage du C.I.E.S (comité international d'étudiant stagiaire) et du fond de recherche du professeur Guy Archambault.

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse, Mme Sylvie Gentier, de m'avoir donné tous les moyens nécessaires pour effectuer ce travail de thèse dans les conditions optimales. Ses conseils judicieux, sa franchise, son encadrement, sa compétence, son sens de travail soigné et efficace ont sans aucun doute fortement contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Je remercie M. Guy Archambault professeur à l'UQAC, codirecteur de cette thèse, pour son encadrement fortement apprécié, ses compétences scientifiques, ses idées avant-gardistes et son encouragement exemplaire, qui m'ont aidé dans l'aboutissement de ce travail. Je réalise aujourd'hui à quel point j'ai été chanceux d'avoir pu travailler et côtoyer une telle personne. Le professeur médiocre affirme, le bon professeur explique, l'excellent professeur démontre et le grand professeur inspire. Merci Guy pour ton inspiration.

Je remercie M. Alain Rouleau professeur à l'UQAC et Mme Joëlle Riss professeur à l'Université Bordeaux I, membres du comité de cette thèse, pour leur encadrement et leur compétence scientifique, toujours d'une extrême rigueur, qui ont été déterminants au cours de cette thèse. J'éprouve beaucoup de reconnaissance pour le temps et les efforts qu'ils ont consacrés à l'examen approfondi de ce document.

Je remercie M. Bernard Feuga (B.R.G.M.) de bien vouloir remplir la tâche d'examineur externe.

J'aimerais remercier grandement l'apport technique et personnel que m'a apporté M. Christophe Poinclou et son équipe du Laboratoire géotechnique et géomécanique du BRGM. La forte proportion de travail technique à l'intérieur de cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'aide hautement apprécié de Christophe, merci encore.

J'exprime toute ma gratitude à mes amis français pour leur accueil chaleureux, leur extrême gentillesse, leur aide matériel et leurs encouragements répétés. Redha, Nawel, Denis, Marie-Noelle, Sonia et Nicolas, Merci.

Je suis également reconnaissant envers mes amis et confrères d'études, Rock, Stéphane et Nancy qui m'ont apporté leur aide, leur encouragement et leur compétence fortement appréciés.

Je remercie sincèrement le personnel des firmes I.O.S. Services Géoscientifiques et de Groupe-conseil Saguenay de m'avoir fourni le cadre et le matériel nécessaire à la rédaction de cette thèse.

Je veux rendre hommage à ma famille et mes amis qui m'ont soutenu dans mon cheminement de carrière et au cours de mes études.

Enfin, j'ai gardé le plus grand et chaleureux des remerciements pour Marikje. Elle a sacrifié ses priorités en de nombreuses occasions afin de me permettre la réalisation de mon travail. De plus, ses encouragements répétés et son support moral ont permis l'aboutissement de cette thèse. Marikje, cette thèse c'est aussi à toi, merci de tout cœur.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 2 ÉCOULEMENT DANS UNE FRACTURE.....	7
2.1 Hydraulique d'une fracture.....	8
2.1.1 Notions de base en hydraulique	8
2.1.2 Application de la loi cubique à des fractures naturelles.....	20
2.2 Hydromécanique d'une fracture sous contrainte normale.....	24
2.3 Hydromécanique d'une fracture en cisaillement.....	30
2.4 Discussion	46
CHAPITRE 3 MONTAGE EXPÉRIMENTAL	49
3.1 Phases d'étude	50
3.2 Caractérisation du matériau d'étude.....	50
3.3 Répliques de la fracture de granite	52
3.4 Fabrication des répliques.....	52
3.4.1 Les travaux de préfaçabilité	52
3.4.2 Adaptation du dispositif de réalisation des répliques aux essais hydromécaniques	53
3.4.3 Moulage en silicone de la fracture à l'aide des porte-négatifs.....	53
3.4.4 Fabrication des répliques en mortier.....	53

3.4.5 Fabrication des répliques de la deuxième phase	54
3.5 Préparation des répliques pour les essais hydromécaniques en cisaillement	55
3.6 Description du banc d'essai	56
3.6.1 Machine de cisaillement.....	57
3.6.2 Système de récupération	58
3.6.3 Système d'injection du fluide	59
3.6.4 Capteurs de pression	60
3.6.5 Inclinomètre	60
3.6.6 Système d'acquisition et de contrôle	61
3.7 Mise en place des répliques.....	62
CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION DE LA MORPHOLOGIE DES SURFACES DE LA FRACTURE	65
4.1 Introduction	66
4.2 Morphologie des surfaces de la fracture.....	67
4.3 Acquisition des profils à l'aide du rugosimètre.....	68
4.4 Plan de l'échantillonnage des profils.....	70
4.5 Caractérisation des surfaces de la fracture	74
4.5.1 Paramètres de rugosité	75
4.5.2 Résultats pour l'ensemble des répliques par profil indépendant avant cisaillement.....	76
4.5.3 Analyse statistique des hauteurs des aspérités	78
4.5.4 Résultats des coefficient a_3 et a_4 par profil indépendant	79

4.5.5 Résultats des coefficient a_3 et a_4 par direction et les histogrammes des hauteurs	80
4.6 Reproductibilité des répliques	85
4.7 Modélisation des épontes avant cisaillement à l'aide du krigeage.....	85
4.7.1 Le variogramme généralisé.....	87
4.7.2 Ajustement du variogramme expérimental à un modèle théorique	88
4.7.3 Krigeage.....	89
4.7.4 Reconstruction des épontes à l'aide du krigeage	92
4.7.5 Discussion	99
 CHAPITRE 5 PROGRAMME D'ESSAIS	 100
5.1 Introduction	101
5.2 Protocole expérimental.....	101
5.3 Identification des secteurs et directions de cisaillement.....	102
5.4 Phases d'études.....	103
5.4.1 Première phase	104
5.4.2 Deuxième phase	105
5.5 Données recueillies.....	108
5.6 Traitements des données.....	108
5.6.1 Transmissivité intrinsèque	108
5.6.2 Calcul de la transmissivité intrinsèque.....	112
5.6.3 Corrections des mesures de pression	113
5.6.4 Estimation de la hauteur d'eau H.....	116

5.6.5 Débit d'injection dans le calcul de la transmissivité intrinsèque	116
5.6.6 Comportement de la pression lors des injections	117
CHAPITRE 6 ANALYSE DES RÉSULTATS	121
6.1 Introduction	122
6.2 Comportement mécanique.....	123
6.3 Comportement hydraulique global	143
6.3.1 Transmissivité globale en début d'essai	144
6.3.2 Transmissivité globale en fonction des phases de cisaillement	145
6.3.3 Transmissivité intrinsèque globale par niveau de contrainte normale....	150
6.3.4 Courbes de transmissivité intrinsèque en fonction des différents débits	156
6.4 Analyse directionnelle de la récupération	158
6.4.1 Analyse générale des patrons de récupérations.....	158
6.4.2 Analyse directionnelle de l'écoulement en position initiale.....	159
6.4.3 Récupération directionnelle en fonction des différentes phases mécaniques	165
6.4.4 Récupération directionnelle versus basculement	166
6.4.5 Analyse de la récupération directionnelle de l'écoulement en fonction de la direction de cisaillement	170
6.4.6 Résumé des observations	175
6.5 Discussion.....	176
6.6 Conclusion.....	179

CHAPITRE 7 ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES SURFACES DE LA FRACTURE POST CISAILLEMENT.....	180
7.1 Introduction.....	181
7.2 Analyse géostatistique avant et après cisaillement.....	182
7.2.1 Application de l'étude des variogrammes aux surfaces des fractures	182
7.2.2 Comparaison entre l'évolution de la morphologie des surfaces de la fracture et l'écoulement.....	185
7.2.3 Conclusion	186
7.3 Moulage des vides	188
7.3.1 Introduction.....	188
7.3.2 Prise d'empreintes avant cisaillement.....	188
7.3.3 Moulage des vides sous contrainte normale d'une fracture en cisaillement	192
7.3.3.1 Introduction.....	192
7.3.3.2 Protocole de l'injection de la résine	192
7.3.3.3 Démonlage	193
7.3.3.4 Étude de pré-faisabilité de moulage des vides sous contrainte.....	193
7.3.3.5 Discussion.....	200
7.3.4 Moulages des vides à la fin des essais de cisaillement	200
7.3.4.1 Récupération par secteur et les moulages de fin d'essais	201
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	217

RÉFÉRENCES	228
------------------	-----

ANNEXES

A1. CARACTÉRISATION DU MATÉRIAU D'ÉTUDE	235
A1.1 Granulométrie du mortier	236
A1.2 Fabrication et préparation des éprouvettes témoins	238
A1.3 Caractérisation par tests.....	238
A1.3.1 Mesure de la vitesse du son.....	242
A1.3.2 La compression uniaxiale.....	250
A1.3.3 Test de déformalité monoaxiale	255
A1.3.4 Perméabilité.....	257
A2. FABRICATION DES RÉPLIQUES	261
A2.1 Réalisation des répliques de 1995, pièces nécessaires au dispositif.....	264
A2.2 Moulage en silicone de la fracture à l'aide des portes négatifs.....	269
A2.3 Préparation du porte négatif avec empreinte de la fracture en silicone.....	271
A2.4 Assemblage du dispositif.....	272
A2.5 Préparation du mortier	273
A2.6 Tâches.....	276
A2.7 Fabrication des répliques de 1996 et modifications apportées.....	277

A3.	MONTAGE DU SYSTÈME DE CAPTAGE	279
A3.1	Nettoyage et protection des tubes à l'oxydation.....	280
A3.2	Surfaçage des répliques	280
A3.3	Forages d'un puits d'injection.....	280
A3.4	Collage dans le puits d'un tube d'injection.....	282
A3.5	Préparation de la surface de mortier non recouverte	282
A3.6	Nettoyage des répliques à l'acétone	283
A3.7	Collage du dispositif hydraulique.....	284
A3.8	Modifications apportées en 1996.....	287
A4.	SYSTÈME D'INJECTION	288
A4.1	Description du système d'injection de 1996	289
A4.2	Limite du système d'injection	291
A5.	MISE EN PLACE DES RÉPLIQUES	292
A6.	ÉTALONNAGE ET PRÉCISION	295
A7.	PERTE DE CHARGE.....	312
A8.	BASCULEMENT DE LA DEMI-BOÎTE DE CISAILLEMENT	314

A9. RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES EN CISAILLEMENT SUR LA FRACTURE	323
A10. RÉSULTATS DES ESSAIS HYDROMÉCANIQUES SUR LA FRACTURE	349
A11. VARIOGRAMMES	422
A12. ARTICLE AU 36 TH US ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, NY ROCKS, NEW YORK, 1997.....	484

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 2.1</u> :	Écoulement entre deux plaques planes parallèles entre elles.....	12
<u>Figure 2.2</u> :	Écoulement unidirectionnel dans la direction x d'un repère orthonormé (O, x, y, z) , dans une section de largeur unitaire et de hauteur e	19
<u>Figure 2.3</u> :	Domaines de validité des lois d'écoulement dans les fractures (tiré de Louis, 1969).	23
<u>Figure 2.4</u> :	Courbes représentant l'ouverture en fonction du débit normalisé pour deux échantillons de fractures naturelles (monzonite), obtenues pour trois contraintes maximales de référence différentes (tiré de Gale, 1982).	25
<u>Figure 2.5</u> :	Injection du colorant dans le fluide traversant la réplique en Plexiglas de la fracture (tiré de Hakami et Barton, 1990).	28
<u>Figure 2.6</u> :	a - Image binarisée du moulage des vides d'un échantillon de fracture naturelle dans un granite (les pixels blancs représentent les zones de contact) ; b - Modèle de carte des chenaux déduite de l'image binarisée a; (d'après Billaux et Gentier, 1990)	29
<u>Figure 2.7</u> :	Dispositif expérimental (tiré de Maini, 1971).....	31
<u>Figure 2.8</u> :	Perméabilité en fonction du déplacement tangentiel (tiré de Maini, 1971).	31
<u>Figure 2.9</u> :	Appareil biaxial de cisaillement (tiré de Gale et al., 1990).....	32

<u>Figure 2.10</u> : Appareil biaxial de cisaillement (tiré de Makurat et al., 1990).....	34
<u>Figure 2.11</u> : Relation entre l'ouverture hydraulique (e), l'ouverture mécanique (E) et le JRC (tiré de Barton, 1982).	35
<u>Figure 2.12</u> : Comparaison entre la conductivité hydraulique mesurée et calculée durant le cisaillement d'un joint (tiré de Makurat et al. 1990).	36
<u>Figure 2.13</u> : Banc de cisaillement rotatif et écoulement radial (tiré de Olsson, 1992).	37
<u>Figure 2.14</u> : Courbes du rapport $Q/\Delta P$ en fonction du déplacement tangentiel pour les échantillons lisse et rugueux (tiré de Olsson, 1992).....	39
<u>Figure 2.15</u> : Courbes du rapport $Q/\Delta P$ en fonction de la contrainte normale (tiré de Olsson et Brown, 1993).....	40
<u>Figure 2.16</u> : Courbes de la contrainte de cisaillement, du rapport $Q/\Delta P$ et de la fermeture de la fracture en fonction du déplacement tangentiel (tiré de Olsson et Brown, 1993	41
<u>Figure 2.17</u> : Appareil de cisaillement direct (tiré de Esaki et al., 1995).	42
<u>Figure 2.18</u> : Conductivité hydraulique en fonction du déplacement (tiré de Esaki et al., 1995).....	44
<u>Figure 2.19</u> : Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel; (a) joint avec historique; (b) intact (tiré de Esaki et al., 1995).	45



<u>Figure 3.1</u> :	Schéma de la machine de cisaillement.....	58
---------------------	---	----



<u>Figure 4.1</u> :	Figure 4.1: Concept d'aspérités primaires et secondaires (adapté à partir de Kana et al., 1996).....	68
<u>Figure 4.2</u> :	Plan de l'échantillonnage des profils sur les deux épontes.....	73
<u>Figure 4.3</u> :	Résumé de l'emplacement des profils avec les crans correspondants du rugosimètre.	74
<u>Figure 4.4</u> :	Définition des indices de rugosité linéaire R_L . Tiré de Coster et Chermant (1983).....	75
<u>Figure 4.5</u> :	Histogrammes des distributions des hauteurs de la fracture originale.	83
<u>Figure 4.6</u> :	Histogrammes des distributions des hauteurs de la réplique 06.	84
<u>Figure 4.7</u> :	Définition des variables introduites dans le calcul du variogramme	86
<u>Figure 4.8</u> :	Principaux modèles de variogramme utilisés.	90
<u>Figure 4.9</u> :	Exemple d'ajustement à un modèle linéaire+sphérique.	91
<u>Figure 4.10</u> :	Résultat de la modélisation sur les variogrammes moyens des dérivées et des hauteurs de l'éponte A dans la direction 1.....	95
<u>Figure 4.11</u> :	Résultat de la modélisation sur les variogrammes moyens des dérivées et des hauteurs de l'éponte B dans la direction 1.	96
<u>Figure 4.12</u> :	Reconstruction de l'éponte A de la réplique 10 avant cisaillement.....	97

Figure 4.13 : Reconstruction de l'éponte B de la réplique 10 avant cisaillement. 98



Figure 5.1A : Vue de dessus de la position des capteurs de poids autour des échantillons pour les essais dans la direction 0° 103

Figure 5.1B : Vue de dessus de la position des capteurs de poids autour des échantillons pour les essais dans la direction 90° 104

Figure 5.2 : Variation de la charge H_r le long du rayon f de l'éprouvette 109

Figure 5.3 : Schéma d'injection et récupération..... 114

Figure 5.4 : A) Débits calculés pour chacune des répliques aux différents déplacements tangentiels; B) et C) débits calculés pour chacune des répliques..... 118

Figure 5.5 : Exemple type de l'évolution de la pression lors d'injection à différents débits et différents déplacements tangentiels.....120



Figure 6.1 : Courbes de dilatance pour les essais dans les directions 0° et 180° ... 124

Figure 6.2 : Courbes de dilatance pour les essais dans les directions 90° et 270° 125

<u>Figure 6.3</u> :	Premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel des courbes de dilatances des directions 0° et 180°	128
<u>Figure 6.4</u> :	Premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel des courbes de dilatances des directions 90° et 270°	129
<u>Figure 6.5</u> :	Courbes de dilatance par niveau de contrainte normale	130
<u>Figure 6.6</u> :	Courbes de dilatance pour le niveau de contrainte normale 5 MPa.....	131
<u>Figure 6.7</u> :	Angle alpha versus la direction de cisaillement.....	132
<u>Figure 6.8</u> :	Déplacement tangentiel versus les différentes directions de cisaillement.....	133
<u>Figure 6.9</u> :	Résistance au pic et au frottement résiduel versus les différentes directions de cisaillement.....	136
<u>Figure 6.10</u> :	Exemple de courbes montrant le comportement des inclinomètres en fonction du déplacement tangentiel.....	138
<u>Figure 6.11</u> :	Similitude évidente entre les déplacements tangentiels correspondants au changement de pente des inclinomètres alpha 1 et celles correspondants au pic de résistance en cisaillement de l'ensemble des essais.....	139
<u>Figure 6.12</u> :	Angles de basculements au pic et à un déplacement tangentiel de 3 mm pour les différentes directions de cisaillement au quatre niveaux de contrainte normale	139
<u>Figure 6.13</u> :	Inversion dans la fermeture de la fracture.....	142
<u>Figure 6.14</u> :	Transmissivité intrinsèque globale pour tous les essais (injection de 1 l/h).....	143

- Figure 6.15 : Transmissivité intrinsèque en fonction des directions de cisaillement pour les différents paliers de contrainte normale..... 144
- Figure 6.16 : Phases (0-1, 1-2, 2-3, 3-4) de la transmissivité intrinsèque globale en cm^3 en fonction du déplacement tangentiel en millimètre.. 145
- Figure 6.17 : Différence en cm^3 entre les valeurs de transmissivité intrinsèque globale (0.1 mm à 0.3 mm de déplacement tangentiel) et celles de début d'essai en fonction des directions de cisaillement pour les différents niveaux de contrainte normale..... 147
- Figure 6.18 : Phase de forte augmentation de la transmissivité intrinsèque globale en fonction du déplacement tangentiel..... 148
- Figure 6.19 : Phase d'inflexion de la transmissivité globale en fonction du déplacement tangentiel..... 149
- Figure 6.20 : Phase de stabilisation ou de légère augmentation de la transmissivité globale en fonction du déplacement tangentiel..... 149
- Figure 6.21 : Transmissivité intrinsèque en fonction du déplacement tangentiel pour les niveaux de contrainte normale de 3 et 5 MPa. 151
- Figure 6.22 : Transmissivité intrinsèque en fonction du déplacement tangentiel pour les niveaux de contrainte normale de 7 et 9 MPa. 152
- Figure 6.23 : Schéma montrant un cisaillement imposé le long d'une pente ascendante et descendante.. 154
- Figure 6.24 : Courbes de la transmissivité intrinsèque pour les différentes directions de cisaillement à un débit de 1 l/h. 155

<u>Figure 6.25</u> : Comportement de la transmissivité intrinsèque en fonction des débits et de la contrainte normale.	157
<u>Figure 6.26</u> : Exemple du rapport Q/P en fonction du déplacement tangentiel.....	157
<u>Figure 6.27</u> : Évolution de la récupération par secteur	159
<u>Figure 6.28</u> : Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0°.	160
<u>Figure 6.29</u> : Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 3 MPa.	161
<u>Figure 6.30</u> : Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 5 MPa.	161
<u>Figure 6.31</u> : Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 7 MPa.....	162
<u>Figure 6.32</u> : Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 9 MPa.....	162
<u>Figure 6.33</u> : Patrons de récupération de l'écoulement initiaux des deux phases (1995 et 1996) avec des configurations (direction de cisaillement et contrainte normale) identiques.	164
<u>Figure 6.34</u> : Patrons de récupération directionnelle en début d'essai par direction de cisaillement.	165
<u>Figure 6.35</u> : Patrons de récupération directionnelle au frottement résiduel par direction de cisaillement.	166
<u>Figure 6.36</u> : Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 0°.....	167

- Figure 6.37 : Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 90° 168
- Figure 6.38 : Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 180° 169
- Figure 6.39 : Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 270° 169
- Figure 6.40 : Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 3 MPa au déplacement tangentiel de 2 mm. 171
- Figure 6.41 : Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 5 MPa au déplacement tangentiel de 2 mm. 172
- Figure 6.42 : Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 7 MPa au déplacement tangentiel de 2 mm. 173
- Figure 6.43 : Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 9 MPa au déplacement tangentiel

de 2 mm. Patrons de récupération directionnelle en début d’essai
 par direction de cisaillement. 174



Figure 7.1 : Variogrammes moyens des hauteurs d’ordre 0, 1 et 2 de la direction 0
 d’enregistrement des profils pour les épontes A et B cisailés à 9 MPa de
 contrainte normale dans la direction de cisaillement 90°. Les courbes
 brune et verte représentent respectivement l’éponte A avant et après
 cisaillement. Les courbes bleue et rose représentent respectivement
 l’éponte B avant et après cisaillement. 183

Figure 7.2 : Vue en plan montrant l’état des structures après cisaillement de l’éponte
 inférieure. Les flèches rouges indiquent le sens de déplacement de
 l’éponte supérieure lors du cisaillement de la réplique. Le point noir
 représente le pion. Les chiffres 0, 90, 180, 270 représentent les directions
 de cisaillement. Les chiffres R0, R-30, R60 et R90 représentent les
 directions d’enregistrement des profils. Les couleurs bleu (éponte A),
 vert (éponte B) et rouge (les deux épontes) sur lettres représentent les
 structures montrant de la dégradation. 187

Figure 7.3 : Technique d’obtention des empreintes 190

Figure 7.4 : Empreinte finale avant cisaillement et coin étalon 191

Figure 7.5 : Courbes de résistance et de dilataance de l’essai. 195

<u>Figure 7.6</u> :	Moulages des vides de l'essai R01	196
<u>Figure 7.7</u> :	Courbes de résistance et de dilatance de l'essai R03	198
<u>Figure 7.8</u> :	Moulage des vides de la réplique R03	199
<u>Figure 7.9</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 0° , 3 MPa	205
<u>Figure 7.10</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 0° , 5 MPa	206
<u>Figure 7.11</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 0° , 9 MPa	207
<u>Figure 7.12</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 180° , 3 MPa	208
<u>Figure 7.13</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 180° , 9 MPa	209
<u>Figure 7.14</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 90° , 3 MPa	210
<u>Figure 7.15</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 90° , 7 MPa	211
<u>Figure 7.16</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 90° , 9 MPa	212
<u>Figure 7.17</u> :	Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 270° , 3 MPa	213

<u>Figure 7.18</u> : Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 270°, 5	
MPa	214
<u>Figure 7.19</u> : Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 270°, 7	
MPa	215
<u>Figure 7.20</u> : Empreintes pour les essais dans la direction de cisaillement 270°, 9	
MPa	216



<u>Figure A1.1</u> : Courbe granulométrique	237
<u>Figure A1.2</u> : Exemple de courbe d'essai de déformabilité	256



<u>Figure A2.1</u> : Plan du porte négatif	266
<u>Figure A2.2</u> : Plan du tube	267
<u>Figure A2.3</u> : Plan des supports	268



<u>Figure A4.1</u> : Schéma du système d'injection	291
--	-----



Figure A5.1 : Exemple des courbes de déformabilité de la réplique no 17..... 294



Figure A8.1 : Graphiques du comportement mécanique de l'essai PAT4 320

Figure A8.2 : Graphiques du comportement mécanique de l'essai PAT5 321

Figure A8.3 : Graphiques du comportement mécanique de l'essai PAT6 322



Figures A9 : Courbes mécaniques 329



Figures A10 : Courbes mécaniques-hydrauliques 351

Figures A10 : Courbes hydrauliques..... 367



Figures A11 : Variogrammes ordre 0, 1 et 2 425

LISTE DES PHOTOS

<u>Photo 3.1</u> :	Épentes rouge et grise d'une réplique.....	54
<u>Photo 3.2</u> :	Réplique avant le cisaillement.	55
<u>Photo 3.3</u> :	Banc d'essais.....	56
<u>Photo 3.4</u> :	Système de récupération.	59
<u>Photo 3.5</u> :	Système d'injection.....	61
<u>Photo 3.6</u> :	Capteurs de pression	61



<u>Photo 4.1</u> :	Rugosimètre de laboratoire	70
<u>Photo 4.2</u> :	Boîtier avec épentes.....	70



<u>Photo A1.1</u> :	Montage pour les mesures de vitesses du son.....	243
<u>Photo A1.2</u> :	Test de compression uniaxiale	251
<u>Photo A1.3</u> :	Test de déformabilité	255



<u>Photo A2.1</u> :	Porte négatif	265
---------------------	---------------------	-----

<u>Photo A2.2</u> : Supports	265
<u>Photo A2.3</u> : Fracture originale	270
<u>Photo A2.4</u> : Coulage du silicone	270
<u>Photo A2.5</u> : Porte négatif au démoulage.....	271
<u>Photo A2.6</u> : Assemblage du dispositif	273
<u>Photo A2.7</u> : Tâches sur les répliques	276
<u>Photo A2.8</u> : Démoulage des répliques	278



<u>Photo A3.1</u> : Rectification des répliques.....	281
<u>Photo A3.2</u> : Forage d'un puits d'injection centré	281
<u>Photo A3.3</u> : Surcarrotage de 10 mm de diamètre	281
<u>Photo A3.4</u> : Collage d'un tube d'injection.....	283
<u>Photo A3.5</u> : Préparation de la surface de mortier	283
<u>Photo A3.6</u> : Dispositif de captage du fluide	284
<u>Photo A3.7</u> : Bande inférieure du système de récupération	285
<u>Photo A3.8</u> : Bande supérieure du système de récupération	285
<u>Photo A3.9</u> : Fabrication des collerettes des tuyaux de récupération.....	286
<u>Photo A3.10</u> : Installation des tuyaux de récupération.....	286



<u>Photo A8.1</u> : Échantillon en PVC.....	316
<u>Photo A8.2</u> : Échantillon en PVC avec papier sablé.....	316
<u>Photo A8.3</u> : Papiers sablés après les essais.....	317



LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableau 2.1</u> : Lois d'écoulement dans les fissures et débits correspondants (tiré de Louis, 1969).	24
--	----



<u>Tableau 3.1</u> : Mise en place des répliques	64
--	----



<u>Tableau 4.1</u> : Paramètres R_L , Z_2 et Z_4 pour la fracture originale et les répliques par profil indépendant.	77
---	----

<u>Tableau 4.2</u> : Paramètres a_3 et a_4 pour la fracture originale et les répliques par profil indépendant.	81
---	----

<u>Tableau 4.3</u> : Résultats des coefficients a_3 et a_4 (par direction et total) pour la fracture originale et les répliques 6 et 7.	82
--	----



<u>Tableau 5.1</u> : Caractéristiques des essais de la première phase.	105
<u>Tableau 5.2</u> : Caractéristiques des essais de la deuxième phase.....	106



<u>Tableau 7.1</u> : Structures avant cisaillement	184
<u>Tableau 7.2</u> : Moulage des vides des répliques du programme d'essai	189



<u>Tableau A1.1</u> : Caractéristiques des éprouvettes témoins pour le mortier	239
<u>Tableau A1.2</u> : Mesure de la vitesse des ondes longitudinales	244
<u>Tableau A1.3</u> : Mesure de la vitesse des ondes transversales	247
<u>Tableau A1.4</u> : RC et rapport d'élanement pour les témoins du mortier traffix 1995.....	252
<u>Tableau A1.5</u> : RC pour les témoins du mortier traffix 1995.....	252
<u>Tableau A1.6</u> : RC et rapport d'élanement pour les témoins du mortier traffix 1996.....	253
<u>Tableau A1.7</u> : RC pour les témoins du mortier traffix 1996.....	254
<u>Tableau A1.8</u> : Essais de perméabilité.....	258



Tableau A2.1 : Réalisations des répliques de 1995-96..... 262



Tableau A5.1 : Mise en place des répliques..... 293



Tableau A9.1 : Comportement mécanique des joints (1996)..... 325

CHAPITRE 1
INTRODUCTION GÉNÉRALE

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans un massif rocheux fracturé dont la matrice rocheuse est de faible porosité (ex: un granite), l'écoulement s'effectue principalement dans le réseau de fractures qui le recoupe. Pour un état de contrainte donné, la connectivité des fractures du réseau et la perméabilité de chacune des fractures sont deux variables importantes qui déterminent le comportement hydraulique global. La perméabilité de chacune des fractures est fonction de l'espacement entre les épontes. Si les deux épontes ne sont pas en contact, l'écoulement se fait sur toute la surface de la fracture; si les épontes sont imbriquées, l'écoulement se fait par l'intermédiaire de chenaux. Si l'évolution de la perméabilité en fonction de la variation de la contrainte normale sur une fracture a fait l'objet de plusieurs travaux, l'évolution de la perméabilité d'une fracture soumise au cisaillement a fait l'objet de peu de recherche jusqu'à présent.

Pourtant, la prévision de la perméabilité et le comportement de l'écoulement (isotrope ou anisotrope) en fonction du cisaillement imposé par une variation du champ des contraintes est de la plus haute importance dans plusieurs travaux d'ingénierie (exploitation de réservoirs de pétrole, stockage souterrain, enfouissement de déchets radioactifs etc.). Dans ces ouvrages, les variations de contraintes provenant de diverses sources

(température, pression interstitielle, mécanique...) peuvent modifier l'ouverture des fractures et provoquer des changements dans la perméabilité des terrains. Ces variations d'ouverture peuvent être dues à la fois à des cisaillements (dilatance, contractance) et à des variations de la contrainte normale (fermeture, ouverture de l'espace entre les épontes).

À cause du nombre très restreint de travaux réalisés sur le comportement hydraulique des joints en cisaillement, ce projet vise à combler de nombreuses lacunes dans les connaissances sur ce sujet. En plus de caractériser et quantifier les paramètres caractéristiques de l'écoulement dans une fracture en cisaillement, les propriétés du comportement de l'écoulement (isotropie ou anisotropie) sont quantifiées en fonction de la direction du cisaillement, du niveau de contrainte normale appliquée et des différentes phases de comportement mécanique de la fracture soumise au cisaillement.

Ce projet de recherche de doctorat à l'UQAC a été effectué en collaboration avec une équipe française à la Direction de la Recherche du BRGM, où les essais ont été réalisés, et au CDGA de l'Université de Bordeaux I. Il est la suite logique d'un autre projet portant sur le comportement mécanique d'une fracture en cisaillement (R. Flamand, 2000).

Organisation de la thèse

D'une manière générale, cette thèse axée sur des travaux expérimentaux est divisée en deux parties importantes. Une première partie porte sur le développement des techniques

expérimentales permettant de vérifier le comportement de l'écoulement dans la fracture entre différents pas de cisaillement sous contrainte normale. La deuxième partie consiste à effectuer un programme d'essais d'écoulement sur une fracture en cisaillement sous différentes contraintes normales et directions de cisaillements.

Parallèlement, et afin de compléter cette étude, les analyses de variogrammes, obtenus à l'aide des relevés topographiques (profils) et de moulages des vides ont été faits avant et après cisaillement.

La thèse se divise en sept chapitres: (chapitre 1 Introduction)

Le chapitre 2 présente une revue des connaissances de base sur l'hydraulique d'une fracture et une rétrospective des études existantes sur les essais hydromécaniques d'une fracture sous contrainte normale seule et en cisaillement dans le but de définir les lacunes dans les connaissances théoriques et expérimentales sur le sujet.

Le chapitre 3 est consacré au développement du montage expérimental, à la caractérisation du matériau d'étude et à la technique de fabrication des répliques de la fracture.

Le chapitre 4 débute par la description de la démarche expérimentale afin d'obtenir les données des profils de fracture. Ces données de profil serviront par la suite à caractériser les surfaces de la fracture étudiée ainsi qu'à quantifier la technique de reproductibilité de celle-

ci. Puis, ce chapitre traite de la restitution des éponges de la fracture à l'aide du krigeage, à partir des données de profils enregistrés à l'aide du rugosimètre de laboratoire.

Le chapitre 5 présente le programme d'essais hydromécaniques sur la fracture en cisaillement sous diverses conditions de contrainte normale et de direction de cisaillement. Dans un premier temps, la distinction entre les deux principales phases d'essais est faite. Par la suite, le protocole expérimental est présenté suivi du traitement des données.

Le chapitre 6 se consacre entièrement à l'analyse du programme d'essais. Cette analyse se fait en trois parties distinctes: 1) l'évaluation du comportement mécanique; 2) l'évaluation du comportement hydraulique globale; 3) l'évaluation directionnelle de la récupération.

Le chapitre 7 traite des techniques (variogramme, moulages des vides) qui permettent d'appuyer la compréhension de l'analyse de l'écoulement dans la fracture (chapitre 6). La géostatistique et le moulage des vides permettent d'obtenir une meilleure connaissance géométrique de l'espace des vides et des zones de contact et de leur évolution au cours du cisaillement. Par la suite, ce chapitre présente l'analyse géostatistique (variogrammes moyens des hauteurs d'ordre 0, 1, 2 par direction d'enregistrement des profils) des éponges de la fracture avant et après cisaillement.

Finalement, ce chapitre décrit et analyse la méthode de moulage des vides des répliques et présente les premiers développements d'un nouveau procédé permettant le moulage des vides d'une fracture en cisaillement sous contrainte normale.

CHAPITRE 2
ÉCOULEMENT DANS UNE FRACTURE

CHAPITRE 2

ÉCOULEMENT DANS UNE FRACTURE

Dans le but d'avoir une meilleure compréhension des données bibliographiques du comportement hydromécanique d'une fracture en cisaillement nous regarderons tout d'abord, l'hydraulique d'une fracture puis son comportement sous contrainte normale, pour terminer avec l'analyse des travaux expérimentaux effectués sur le comportement hydraulique de fractures en cisaillement.

2.1 Hydraulique d'une fracture

2.1.1 Notions de base en hydraulique

Tout problème d'écoulement en thermodynamique des fluides newtoniens* peut se ramener à la détermination des six inconnues suivantes (Marsily, 1981):

- ρ la masse volumique du fluide,
- p la pression,
- θ la température,
- u_1, u_2, u_3 les trois composantes de la vitesse (u) du fluide.

**Un fluide newtonien est un fluide isotrope, dont la pression ne dépend que des variables d'état ρ et θ , dont le tenseur de viscosité est une forme linéaire du gradient de vitesse et dont les coefficients ne dépendent que des variables d'état.*

Toutes ces inconnues sont fonction du temps t et des points de l'espace x_i .

Pour déterminer ces six inconnues, il faut parvenir à établir six équations indépendantes.

Nous disposons pour cela:

- De l'équation de continuité, qui exprime la conservation de la matière.

$$\operatorname{div}(\rho \vec{u}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

- Des équations de Navier-Stokes (3), ou équations de la dynamique, qui expriment le principe de la mécanique: $\vec{f} = m\vec{\gamma}$ pour des fluides visqueux dont les coefficients de viscosité sont supposés constants.

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} u_i \right) - \mu \Delta u_i = \rho \vec{F}_i \quad \forall i = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

où μ = coefficient de viscosité dynamique [$M L^{-1} T^{-1}$] et

\vec{F} = le vecteur des forces à distance par unité de masse (comme la gravité par exemple).

L'expression (2.2) est parfois présentée en la divisant par ρ . Il apparaît alors un nouveau coefficient ν appelé « coefficient de viscosité cinématique » dont l'expression est la suivante :

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad [L^2 T^{-1}] \quad (2.3)$$

- De l'équation de la chaleur qui exprime le transport conductif et convectif de la chaleur par le fluide. Néanmoins, en milieu poreux, on pourra souvent simplifier le problème en constatant que l'extrême division du milieu poreux et son énorme capacité calorifique font que les écoulements y sont en pratique toujours isothermes. Cette équation peut être négligée ainsi que la variable température.

- De l'équation d'état du fluide qui exprime la compressibilité du fluide.

$$\rho = \rho_0 e^{\beta(p-p_0)} \quad (2.4)$$

où β = au coefficient de compressibilité du fluide $[M^{-1} L T^2]$ et

ρ_0 et p_0 sont respectivement les valeurs de la masse volumique et de la pression au temps $t = 0$.

Traditionnellement en hydrogéologie, ces équations sont résolues en apportant des simplifications à la nature de l'écoulement et à la géométrie du problème.

⇒ Simplification en relation avec la nature de l'écoulement et résolution des équations.

En supposant l'écoulement laminaire (lent), permanent, d'un fluide incompressible, nous obtenons les simplifications suivantes:

- Pour les écoulements permanents, nous pouvons écrire:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \quad \forall i = 1, 2, 3 \quad \text{et} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

L'équation de continuité devient donc:

$$\text{div}(\rho \vec{u}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.6)$$

- Pour les fluides incompressibles, nous pouvons imposer:

$$\rho(\vec{x}, t) = cte \quad (2.7)$$

L'équation de continuité devient donc:

$$0 = \text{div}(\rho \vec{u}) = \rho \text{div} \vec{u} \Rightarrow \text{div} \vec{u} = 0 \quad (2.8)$$

Puisque l'écoulement est incompressible et isotherme, le nombre d'inconnues est réduit à quatre, et les trois équations manquantes sont les équations de Navier-Stokes adaptées de la façon suivante:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} - \mu \Delta \vec{u}_i = \rho (\vec{F}_i - \vec{u} \cdot \vec{\nabla} u_i) \quad \forall i = 1, 2, 3 \quad (2.9)$$

⇒ **Simplifications apportées dues à la géométrie du problème.**

Considérons, dans le repère orthonormé (O, x_1, x_2, x_3) , une fissure symbolisée par deux plans horizontaux « infinis », séparés d'un écartement e . Ces plans ont pour équations: $(x_3 = 0)$, et $(x_3 = e)$ (figure 2.1).

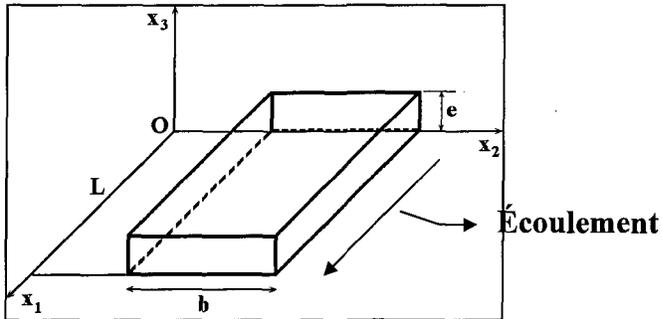


Figure 2.1: Écoulement entre deux plaques planes parallèles entre elles.

L'écoulement parallèle s'effectue dans le sens positif de la direction x_1 : la vitesse \bar{u} n'a donc qu'une seule composante non nulle u_1 . Cette vitesse ne dépend ni de x_1 , ni de x_2 , mais seulement de x_3 . Ces conditions peuvent être exprimées sous la forme suivante:

$$u_2 = u_3 = 0 \quad (2.10a)$$

et

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} = 0 \quad (2.10b)$$

Si le problème est résolu sans l'intervention d'une force extérieure, c'est à dire $\vec{F} = \vec{0}$, alors les équations de Navier-Stokes deviennent finalement:

$$\frac{\partial p}{\partial x_1} = \mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_3^2} \quad (2.11a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_2} = 0 \quad (2.11b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = 0 \quad (2.11c)$$

L'équation (2.11a) ne dépendant que de x_1 dans le premier membre, et de x_3 dans le second membre, toutes deux variables indépendantes, peut être divisée en deux nouvelles équations de la façon suivante:

$$\frac{\partial p}{\partial x_1} = \frac{dp}{dx_1} = C \quad (2.12)$$

$$\mu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_3^2} = \mu \frac{d^2 u_1}{dx_3^2} = C \quad (2.13)$$

où C est une constante.

Fixons maintenant les conditions aux limites du problème. Considérons, non plus les plans infinis, mais une conduite de longueur L dans la direction x_1 , et de largeur b dans la direction x_2 (figure 2.1). La pression p ne dépendant que de la direction x_1 , les conditions fixées sont les suivantes:

$$p = p^{ent} \text{ pour } x_1 = 0 \quad (2.14a)$$

et

$$p = p^{sort} \text{ pour } x_1 = L \quad \text{avec } p^{sort} < p^{ent} \quad (2.14b)$$

L'intégration de l'équation (2.12) conduit alors à l'expression de la pression suivante:

$$p = p^{ent} + \frac{p^{sort} - p^{ent}}{L} x_1 \quad (2.15)$$

Si des conditions d'adhérence du fluide sur les parois inférieure et supérieure de la fissure sont fixées, les conditions aux limites obtenues sont les suivantes:

$$u_1 = 0 \text{ pour } x_3 = 0 \text{ et } x_3 = e \quad (2.16)$$

Nous obtenons, après intégration de l'équation (2.13), le profil parabolique de la vitesse exprimé de la façon suivante:

$$u_1 = \frac{1}{2\mu} \frac{p^{sort} - p^{ent}}{L} (x_3^2 - e x_3) \quad (2.17)$$

⇒ **Loi cubique**

Enfin, si nous calculons le débit à travers la fissure de largeur **b**, nous obtenons:

$$q = \int_0^e b u_1 dx_3 = \frac{b}{12\mu} e^3 \frac{p^{\text{ent}} - p^{\text{sort}}}{L} \quad [L^3/T] \quad (2.18)$$

où q = débit $[L^3/T]$

b = largeur de la fracture $[L]$

e = ouverture de la fracture $[L]$

L = longueur de la fracture $[L]$

p = pression $[M/LT^2]$

μ = viscosité dynamique $[M/LT]$

Cette expression dite "loi cubique" exprime le débit d'un écoulement de fluide qui varie proportionnellement au cube de son ouverture.

Dans le cas des fractures non horizontales, l'action de la pesanteur g comme force extérieure ne peut pas être négligée. Si nous considérons la fracture de la figure 1.1 orientée dans le plan vertical (x_2, x_3) , avec un écoulement dans le sens positif de la direction x_3 , et l'action de la pesanteur s'exerçant comme toujours dans le sens négatif de la direction x_3 , alors l'expression du débit devient:

$$q = \frac{b}{12\mu} e^3 \left(\frac{p^{\text{ent}} - p^{\text{sort}}}{L} - \rho g \right) \quad (2.19)$$

Des concepts supplémentaires doivent être introduits, en tenant compte maintenant de l'action de la pesanteur. C'est le cas de la charge hydraulique, et de la perméabilité.

On définit la charge hydraulique totale h_t en tout point M d'un fluide incompressible soumis à la seule force de gravité, par l'expression suivante:

$$h(M) = \frac{p(M)}{\rho g} + z(M) + \frac{v_2(M)}{2g} \quad (2.20)$$

où $z(M)$ est la hauteur du point M, à partir d'un plan horizontal de référence.

$p(M)$ est la pression statique du fluide au point M, et

$v(M)$ est la vitesse d'écoulement du fluide au point M.

h_t représente l'énergie totale d'un fluide en mouvement. C'est la somme d'un terme de potentiel hydraulique h (appelé encore charge statique, ou cote piézométrique), et d'un terme d'énergie cinétique E_c ; ces deux termes sont définis comme suit:

$$h(M) = \frac{p(M)}{\rho g} + z(M) \quad (2.21)$$

$$E_c(M) = \frac{v_2(M)}{2g} \quad (2.22)$$

Maintenant, reprenant l'équation (2.19) exprimant le débit dans la direction x_1 , on obtient l'expression du débit généralisée à toutes les directions de l'espace:

$$\vec{q} = -\frac{b}{12\mu} e^3 (\vec{\nabla}p + \rho g \vec{\nabla}x_3) = -\frac{b}{12\mu} e^3 \rho g \vec{\nabla} \left(\frac{p}{\rho g} + x_3 \right) = -\frac{\rho g}{12\mu} b e^3 \vec{\nabla} h \quad (2.23)$$

Si on appelle $A = b e$, la section laissée à l'écoulement, alors le débit s'exprime encore sous la forme suivante:

$$\vec{q} = -\frac{\rho g}{12\mu} e^2 A \vec{\nabla}h \quad (2.24)$$

La perméabilité est un tenseur du second ordre et symétrique. Dans le cas d'un écoulement unidirectionnel dans un milieu poreux isotrope, par définition, la perméabilité κ de ce milieu poreux est:

$$\kappa = \frac{\|\vec{q}\|}{A \|\vec{\nabla}h\|} \quad [LT^{-1}] \quad (2.25)$$

La perméabilité est donc homogène à une vitesse. Dans le cas de la loi cubique, la perméabilité devient:

$$\kappa = \frac{\rho g e^2}{12\mu} \quad (2.26)$$

On définit une perméabilité propre à la fracture, indépendante de la nature du fluide: c'est la perméabilité intrinsèque κ_f (on la note aussi κ_f pour insister sur le fait qu'elle ne dépend que de la fracture), reliée à la perméabilité κ par la formule suivante:

$$\kappa_f = \frac{\mu}{\rho g} \kappa \quad [\text{L}^2] \quad (2.27)$$

Dans le cas de la loi cubique, la perméabilité intrinsèque devient:

$$\kappa_f = \frac{e^2}{12} \quad (2.28)$$

Dans le domaine de l'écoulement dans les fractures, on emploie également un autre terme synonyme de perméabilité: c'est la conductivité hydraulique. En fait, la perméabilité est une notion fortement associée aux milieux poreux; une fracture n'étant, en toute rigueur, pas un milieu poreux, la même quantité est donc caractérisée sous le terme, semble-t-il plus approprié, de conductivité hydraulique de la fracture.

Une autre notion est aussi utilisée: la transmissivité. Considérons un écoulement unidirectionnel dans la direction x d'un repère orthonormé (O, x, y, z) , dans une section de largeur unitaire et de hauteur e , comme le montre la figure 2.2.

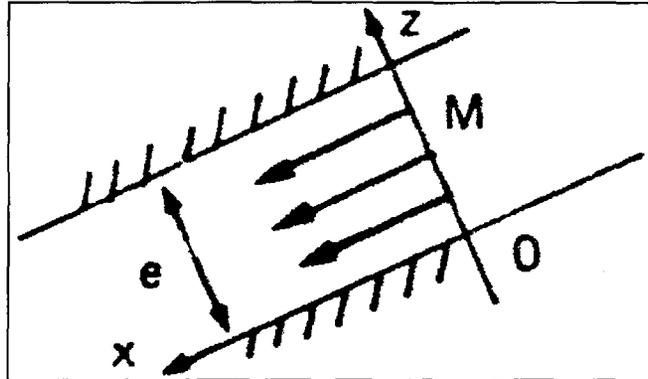


Figure 2.2: Écoulement unidirectionnel dans la direction x d'un repère orthonormé (O, x, y, z) , dans une section de largeur unitaire et de hauteur e .

Si \overline{K} est le tenseur de perméabilité dans le plan (x, y) passant par tout point M de l'axe (O, z) , alors le tenseur de transmissivité \overline{T} est défini par l'intégrale:

$$\overline{T} = \int_0^e \overline{K} dz \quad (2.29)$$

Si la perméabilité est isotrope et constante suivant l'axe (O, z) alors la transmissivité T est tout simplement définie comme le produit de la perméabilité K par l'ouverture e ; elle est souvent notée sous la forme du produit Ke (dimension $[L^2 T^{-1}]$). Aussi on peut également définir une transmissivité intrinsèque $K_f e$ (dimension $[L^3]$).

2.1.2 Application de la loi cubique à des fractures naturelles

De nombreuses études ont été réalisées pour tester la validité de cette loi dans le cas de fractures, d'abord idéalisées, puis de géométrie de plus en plus réelle. Parmi les travaux expérimentaux effectués, on note celle de Romm (1966) qui a utilisé deux plaques de verre non en contact. Pour simuler une certaine rugosité des épontes, Lomize (1951) et Huitt (1956) ont eu l'idée de coller des grains de sable sur les parois lisses de leurs plaques, alors que Parrish (1963) a collé des billes de verre. Enfin, Baker (1955) et Louis (1969) ont utilisé des surfaces en béton, dont la rugosité était déterminée par la granulométrie du mélange de sable et de ciment. C'est à partir de ces expériences que Louis a proposé le modèle ci-dessous.

De la charge hydraulique h , est déduit le gradient hydraulique \vec{J} défini par:

$$\vec{J} = -\vec{\nabla}h \quad (2.30)$$

Les pertes d'énergie, lors d'un écoulement, sont évaluées par l'intermédiaire du coefficient de perte de charge λ . λ est défini indirectement dans l'expression d'un gradient hydraulique \vec{J} qui n'est autre que la projection orthogonale du gradient hydraulique \vec{J} dans le plan de chaque élément; il fixe ainsi la direction d'écoulement si la conductivité hydraulique de la fracture est isotrope. Lorsqu'on considère une fissure élémentaire indépendante, \vec{J} et \vec{J}_i sont confondus.

$$\vec{J}_i = \lambda \frac{\bar{v}^{-2}}{2gD_h} \quad (2.31)$$

où \bar{v} est la vitesse moyenne d'écoulement dans la fissure (vitesse du fluide se déplaçant de manière uniforme sur tout le profil et produisant le même débit).

D_h est le diamètre hydraulique de la fissure défini par:

$$D_h = 4S/P \text{ [L]} \quad (2.32)$$

où S = section d'écoulement [L^2], et

P = périmètre extérieur [L].

D_h : est égal à deux fois l'ouverture dans le cas d'une fracture.

Dans une fissure individuelle, Louis exprime le débit q sous la forme suivante:

$$q = S_i \bar{v} \quad (2.33)$$

où S_i est la section de la fissure perpendiculairement à l'écoulement.

Louis (1969) a caractérisé alors cinq domaines correspondant à cinq types différents d'écoulement. Pour distinguer ces cinq types d'écoulement, il a employé les qualificatifs suivants:

- laminaire lisse
- turbulent lisse

- turbulent rugueux
- laminaire rugueux
- turbulent très rugueux

Pour caractériser ces domaines et définir leurs frontières, Louis a utilisé deux paramètres adimensionnels. Ces paramètres sont, d'une part, le nombre de Reynolds R_e , et la rugosité relative R_r (équation 2.34, 2.35).

$$R_e = \frac{\bar{v} D_h \rho}{\mu} \quad (2.34)$$

où \bar{v} = vitesse moyenne [L/T], et

ρ = densité [M/L³]

$$R_r = \varepsilon / D_h \quad (2.35)$$

où ε = hauteur moyenne des aspérités dans la fracture (microrugosité)

Les cinq domaines définis empiriquement à partir de ces deux paramètres sont illustrés sur la figure 2.3. On y retrouve la séparation entre les régimes laminaires et turbulents par le nombre de Reynolds $R_e = 2300$, et la séparation introduite par Louis via le paramètre de rugosité relative $R_r = 0,033$ entre les écoulements parallèles et non parallèles. Ce seuil de 0,033 signifie que la hauteur des aspérités ne doit pas excéder 7% de l'ouverture hydraulique de la fracture. Pour les valeurs ε/D_h supérieures à 0,033, l'écoulement ne peut être considéré comme parallèle et ne peut être représenté par les

lois existantes. Les lois d'écoulement que Louis (1969) fait correspondre à chacun de ces cinq domaines sont présentées au tableau 1 sous la forme du coefficient de perte de charge λ dans la première colonne et les débits unitaires correspondant sont présentés dans la seconde colonne.

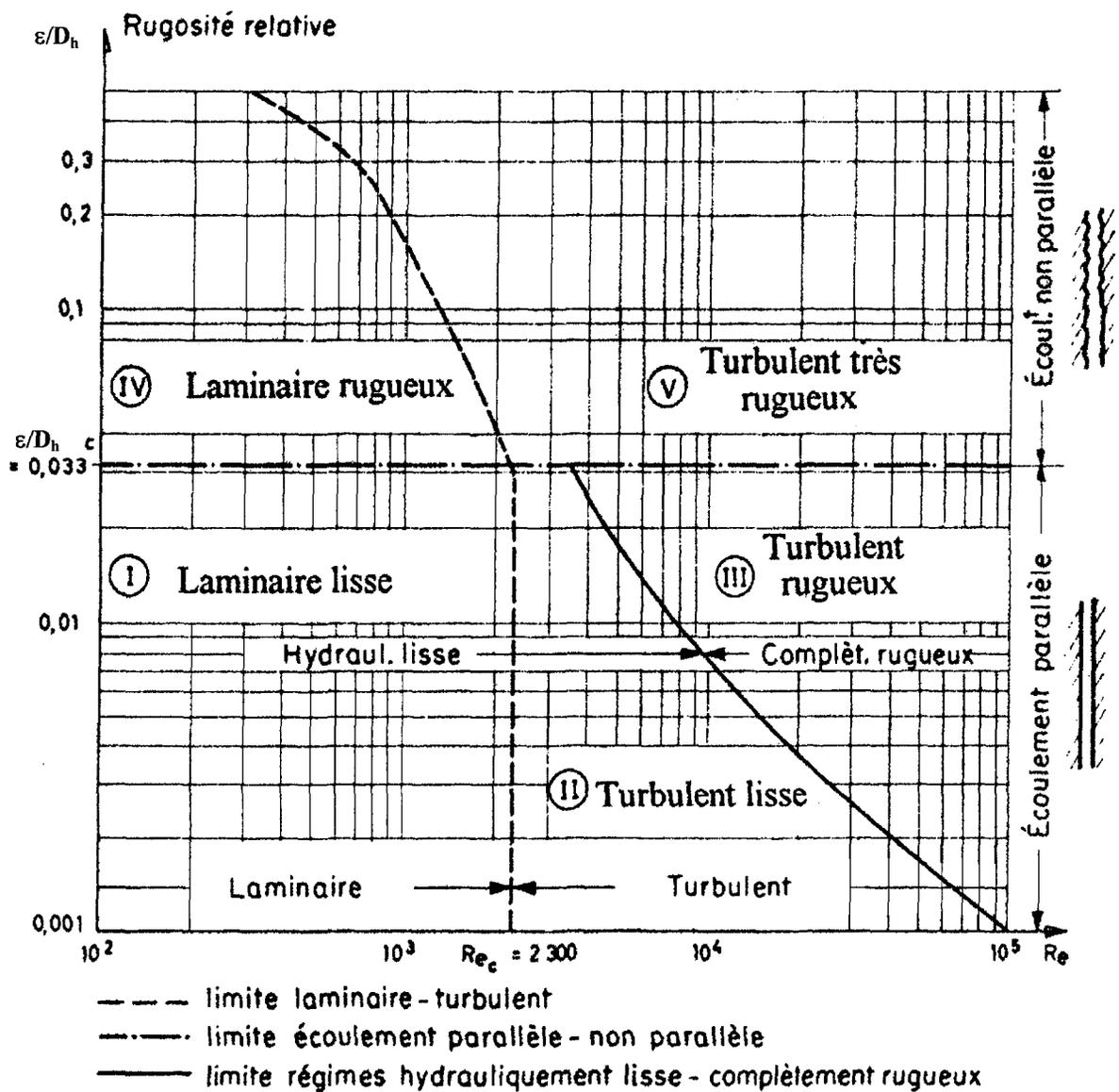


Figure 2.3: Domaines de validité des lois d'écoulement dans les fractures (tiré de Louis, 1969).

Tableau 2.1: Lois d'écoulement dans les fissures et débits correspondants (tiré de Louis, 1969).

	Régime	Loi d'écoulement	Débit (pour une largeur unitaire)
ÉCOUL Parallèle ε/D_h <0,033	laminaire	$\lambda = \frac{96}{Re}$ (1) POISEUILLE	$q = \frac{\theta}{12\nu} e^3 J_1$
	turbulent	$\lambda = 0,316 Re^{-1/4}$ (2) BLASIUS	$q = \left[\frac{\theta}{0,079} \left(\frac{2}{\nu} \right)^{1/4} e^3 J_1 \right]^{4/7}$
		$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{\varepsilon/D_h}{3,7}$ (3) NIKURADSE	$q = 4\sqrt{g} \left(\log \frac{3,7}{\frac{\varepsilon}{D_h}} \right) e^{1,5} \sqrt{J_1}$
ÉCOUL NON Parallèle ε/D_h >0,033	laminaire	$\lambda = \frac{96}{Re} \left[1 + 8,8 \left(\frac{\varepsilon}{D_h} \right)^{1,5} \right]$ (4) LOUIS	$q = \frac{\theta e^3}{12\nu \left[1 + 8,8 \left(\frac{\varepsilon}{D_h} \right)^{1,5} \right]} J_1$
	turbulent	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{\varepsilon}{D_h} \frac{1}{1,9}$ (5) LOUIS	$q = 4\sqrt{g} \left[\log \frac{1,9}{\frac{\varepsilon}{D_h}} \right] e^{1,5} \sqrt{J_1}$

2.2 Hydromécanique d'une fracture sous contrainte normale

Gale (1982) a cherché à vérifier si les lois de Louis (1969) définissent adéquatement le comportement hydraulique d'une fracture granitique rugueuse à différents niveaux de rugosité et d'aire de contact. Pour examiner la validité de la loi cubique, Gale a relié la valeur de l'ouverture hydraulique "e_h" ou encore "e", et la fermeture "ΔV" de la fracture selon l'expression suivante:

$$e = \Delta V + e_{rés} \quad (2.36)$$

où $e_{rés}$ est l'ouverture résiduelle subsistant sous la contrainte normale maximale.

Gale a montré que la loi cubique n'est pas valable si l'ouverture résiduelle est évaluée sous une forte contrainte (30 MPa). Par contre, plus la contrainte maximale de référence (celle qui sert à déterminer $e_{rés}$) est faible, meilleure est l'approximation par la loi cubique (figure 2.4). Ceci revient à dire que la loi cubique est éventuellement applicable pour les faibles niveaux de contraintes, la valeur maximale de la contrainte au-delà de laquelle elle n'est plus valable étant plus petite pour une fracture artificielle que pour une fracture naturelle.

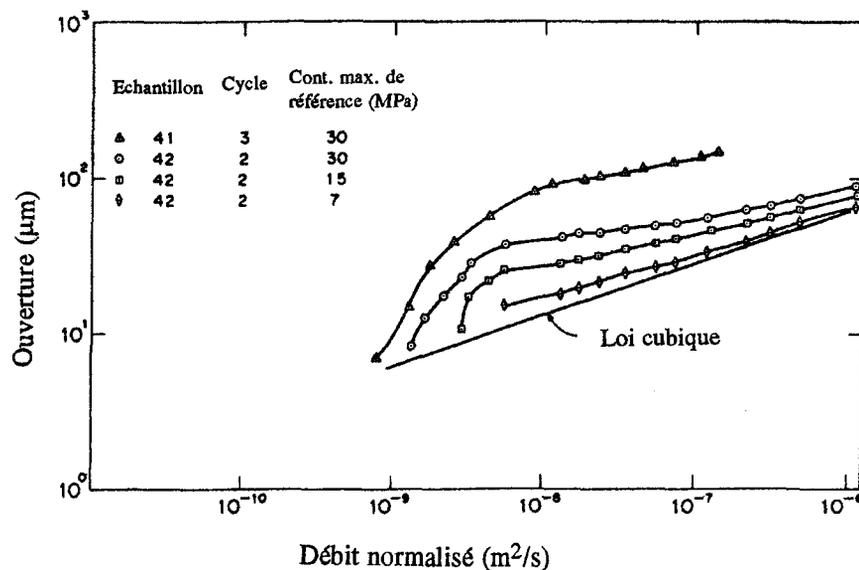


Figure 2.4: Courbes représentant l'ouverture en fonction du débit normalisé pour deux échantillons de fractures naturelles (monzonite), obtenues pour trois contraintes maximales de référence différentes (tiré de Gale, 1982).

Par ailleurs, Raven et Gale (1985) ont montré que, pour une contrainte maximale de référence de 30 MPa, la déviation par rapport à la loi cubique est d'autant plus importante que la dimension de l'échantillon est grande. Ceci est expliqué par les auteurs par une augmentation de l'importance du rôle de la rugosité des épontes sur l'écoulement. La rugosité peut réduire la transmissivité de deux façons: en augmentant la résistance à la friction le long des surfaces libres et/ou en créant des zones de contact entre les épontes de la fracture qui provoqueraient un cheminement de plus en plus tortueux et donc une augmentation de la longueur parcourue par les filets liquides provoquant une diminution du gradient hydraulique et du débit. De plus, pour un échantillon de taille donnée, l'écart avec la loi cubique augmente avec le nombre de cycle de chargement.

Gentier (1986), qui a étudié une fracture naturelle de granite, montre que la fermeture maximale de la fracture, pour des contraintes normales de 10 à 15 MPa, est de l'ordre de 30% de l'ouverture initiale moyenne. Au-delà, la fracture se comporte comme un milieu continu élastique, voisin de la roche intacte. Gentier note, avec l'augmentation de la contrainte normale, des variations de la transmissivité intrinsèque de la fracture. D'après Gentier, la diminution rapide de la transmissivité pour les premiers niveaux de contrainte normale correspond à la diminution du nombre de microchenaux interconnectés et dans une part moindre à la diminution du volume de ces microchenaux. A partir du niveau critique de 15 MPa, la diminution plus faible et moins rapide de la transmissivité correspond non plus à une variation du nombre d'exutoires principaux mais probablement aux variations du volume de ces microchenaux. On

définit la transmissivité intrinsèque, pour un écoulement radial, par l'expression suivante:

$$K_{fe} = -\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_e} \frac{q}{\Delta P} \quad [L^3] \quad (2.37)$$

où q = débit $[L^3/T]$

P = pression $[M/LT^2]$

μ = viscosité dynamique $[M/LT]$

r_i = rayon intérieur $[L]$

r_e = rayon extérieur $[L]$

De plus, les essais de Gentier (1986) ont permis de démontrer physiquement l'existence et le rôle des structures de la morphologie des surfaces de la fracture sur le comportement hydromécanique de la fracture, et sur la chenalisation lorsque la contrainte normale augmente. Sous faible contrainte normale, l'écoulement peut être considéré comme quasi-généralisé du fait du nombre de chenaux et de leur répartition. L'écoulement est régi par la plus petite de deux structures mises en évidence par l'analyse géostatistique de la morphologie des surfaces de la fracture. À partir d'un niveau de contrainte critique (10 à 15 MPa) l'écoulement est fortement canalisé par la deuxième structure. Cette caractéristique de chenalisation de l'écoulement (petits chenaux raccordés les uns aux autres constituant un réseau), a été mis en évidence par quelques chercheurs, et à l'aide de divers essais. Citons, à titre d'exemple, les travaux de Hakami et Barton (1990), qui ont porté sur les observations du cheminement d'un fluide coloré entre les répliques en Plexiglas transparent des deux épontes d'une fracture

naturelle (figure 2.5). Citons aussi les travaux de Billaux et Gentier (1990), qui déduisent la carte des chenaux d'un échantillon de fracture granitique naturelle à partir de divers traitements numériques de l'image binarisée du moulage des vides (figure 2.6). Ces travaux permettent de conclure que, plus l'écartement entre les deux épontes d'une fracture est grande par rapport à la hauteur des aspérités de cette fracture, moins la chenalisation influe sur l'écoulement.

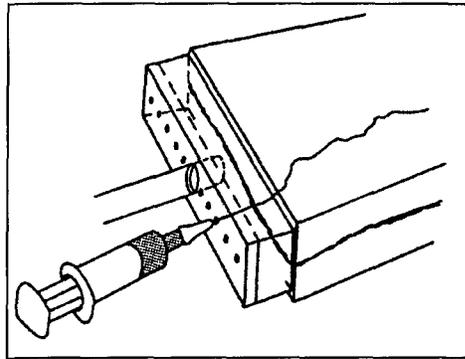


Figure 2.5 : Injection du colorant dans le fluide traversant la réplique en Plexiglas de la fracture (tiré de Hakami et Barton, 1990).

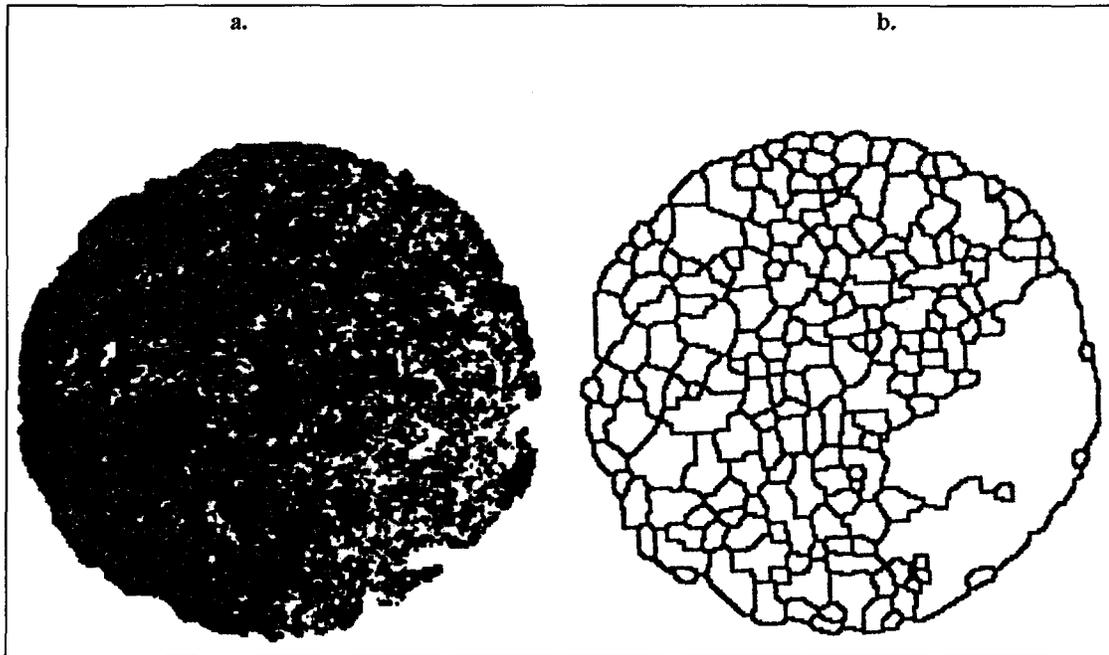


Figure 2.6: a - Image binarisée du moulage des vides d'un échantillon de fracture naturelle dans un granite (les pixels blancs représentent les zones de contact); b - Modèle de carte des chenaux déduite de l'image binarisée a; (d'après Billaux et Gentier, 1990).

Des modélisations numériques ont été faites selon trois voies différentes. La première voie représente les modèles qui tentent d'adapter la loi cubique au cas des fractures réelles (Louis, 1974). La deuxième voie représente les modèles qui reposent sur une géométrie de fracture dont l'ouverture varie sur toute sa surface, dans lesquels la loi cubique est supposée valide localement (Sharp et Maini, 1972; Tsang et Witherspoon, 1983; Barton et Bandis, 1990; Billaux et Gentier, 1990 et Amadei et Wibowo, 1992).

Les études des deux premières voies de modélisation semblent montrer que le domaine de validité de la loi cubique s'étend difficilement au domaine des fractures

réelles dont les épontes sont presque toujours en contact. C'est pourquoi, la troisième voie utilise les modèles numériques basés sur les équations fondamentales de l'hydraulique (Muralidhar et Long, 1987). Brièvement, cette méthode se divise en deux grandes étapes:

La première consiste à transformer la forme volumique complexe d'une fracture dans son espace réel, en une forme aux contours simples (parallélépipédique rectangle) dans un nouvel espace.

La seconde consiste à calculer les écoulements dans cet espace transformé, et à les restituer dans l'espace réel par la transformation inverse.

2.3 Hydromécanique d'une fracture en cisaillement

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le comportement hydraulique d'une fracture sous contrainte normale a été passablement étudié. Mais, jusqu'à maintenant, peu de travaux de recherche ont porté sur le comportement hydromécanique d'une fracture en cisaillement.

Maini, en 1971 a étudié expérimentalement l'écoulement dans une fracture à l'aide d'un montage très simple (figure 2.7). Il a observé, pour un joint dilatant en cisaillement sous faible contrainte normale, une augmentation de la perméabilité de 1 à 2 ordres de grandeur pour un déplacement tangentiel de 5 mm (figure 2.8).

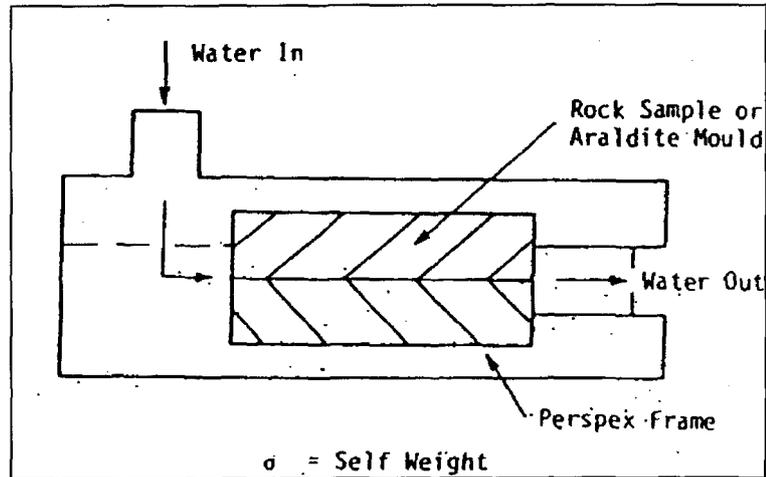


Figure 2.7: Dispositif expérimental (tiré de Maini, 1971).

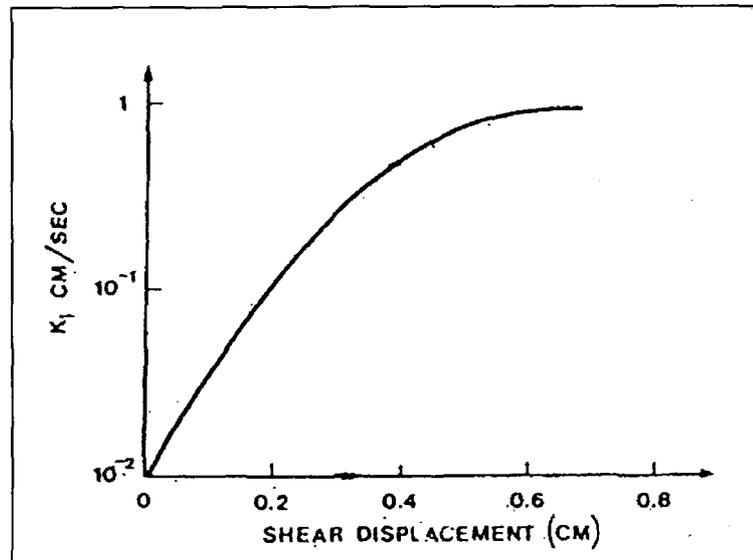


Figure 2.8: Perméabilité en fonction du déplacement tangentiel (tiré de Maini, 1971).

Gale et al. (1990) ont effectué des essais hydromécaniques en cisaillement sur des fractures naturelles de monzonite quartzique remplies de chlorite. Chaque échantillon a été obtenu à partir de carottes de forage de 200 mm de diamètre qui présentaient une fracture orientée parallèlement à l'axe des carottes. Ces fractures planes ont été mises sous essai dans un appareil biaxial de cisaillement (figure 2.9) qui permet de déterminer

la perméabilité dans une fracture plane à des niveaux spécifiques de contrainte normale et de cisaillement suivant une trajectoire particulière des contraintes (τ et σ_n). L'écoulement peut être induit dans la direction parallèle et dans la direction perpendiculaire au cisaillement imposé. Étant donné la capacité du banc de cisaillement et la section étudiée, seulement de petits déplacements en cisaillement ont pu être effectués.

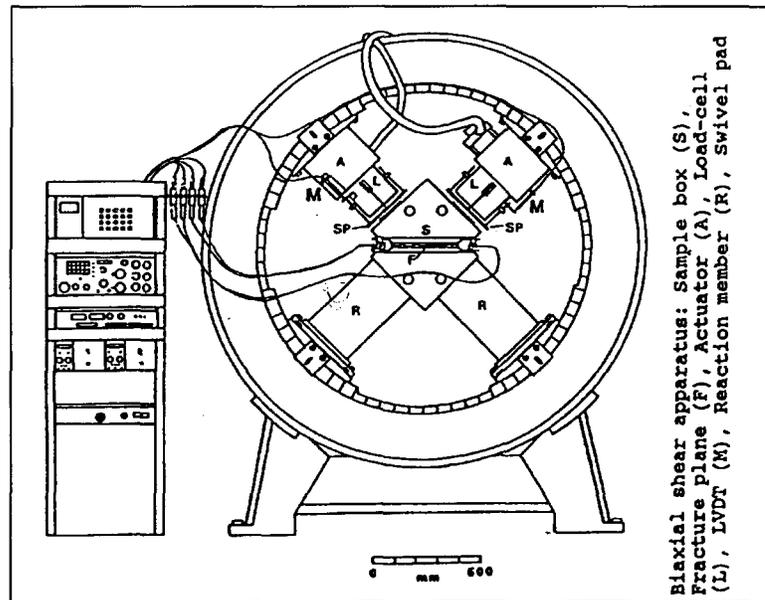


Figure 2.9: Appareil biaxial de cisaillement (tiré de Gale et al., 1990).

Les essais de cisaillement-perméabilité de Gale et al. (1990) ont été réalisés pour deux niveaux de contrainte normale constante. Au deuxième essai, un traceur a été injecté aux positions initiale et finale de cisaillement sous contrainte normale constante. À la fin du cycle de cisaillement (après le test du traceur), les contraintes ont été maintenues pendant l'injection d'une résine dans la fracture.

En résumé, Gale et al. (1990) ont démontré que, pour des fractures de monzonite quartzique plutôt fermées avec remplissage de chlorite:

- la perméabilité décroît lors des premiers dixièmes de mm de déplacement tangentiel;
- les ouvertures mesurées à l'aide de la résine sont plus élevées que celles calculées par le modèle de plaque parallèle lisse et rugueuse;
- les vitesses obtenues par traceur sont plus faibles que celles calculées par le modèle de plaque parallèle lisse et rugueuse; et
- la distribution des épaisseurs de résine peut être approximée par une distribution log-normale.

Makurat et al. (1990) ont effectué des essais hydromécaniques en cisaillement sur plusieurs types de joints impliquant des lithologies différentes. Ils ont fait des essais de cisaillement sur des roches très résistantes (granite, syénite, gneiss) et peu résistantes (argile, grès, craie). La cellule biaxiale utilisée pour ces essais est montrée sur la figure 2.10. L'eau est injectée à une extrémité de la fracture et est récupérée à l'autre extrémité.

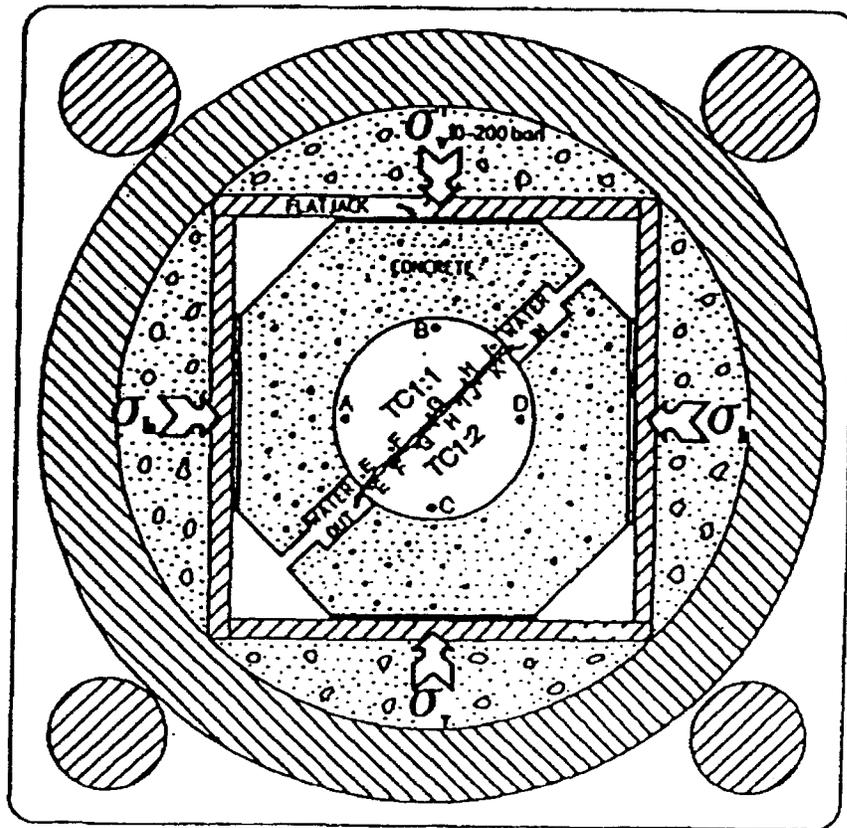


Figure 2.10: Appareil biaxial de cisaillement (tiré de Makurat et al., 1990).

À l'aide de ces essais, les auteurs voulaient démontrer en premier lieu comment se comportait leur modèle empirique d'ouverture (figure 2.11). Ce modèle relie l'ouverture mécanique réelle (E), l'ouverture hydraulique (e) ou (e_h) calculée à partir du modèle de plaque lisse et parallèle (loi cubique) et le JRC ("*Joint Roughness coefficient*").

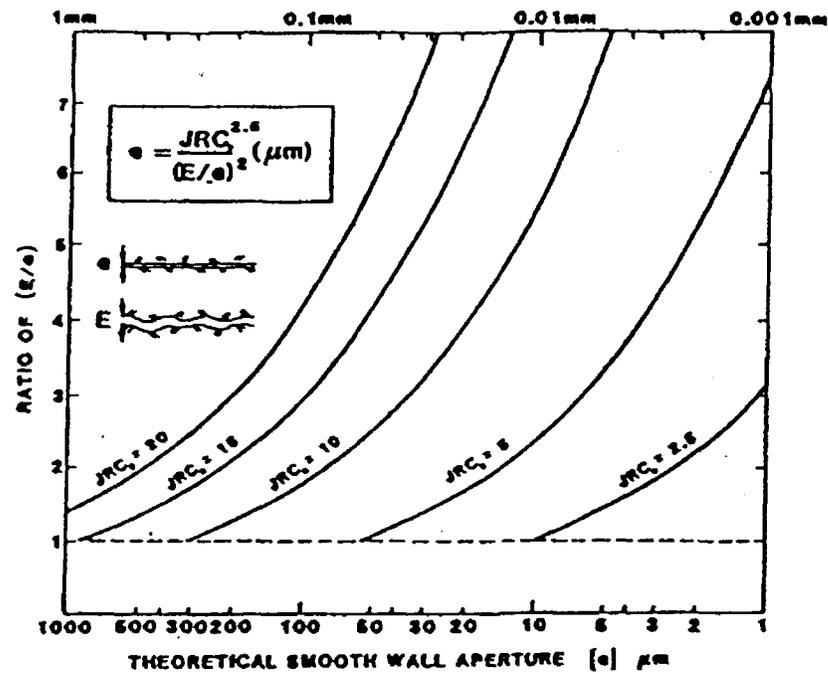


Figure 2.11: Relation entre l'ouverture hydraulique (e), l'ouverture mécanique (E) et le JRC (tiré de Barton, 1982).

$$e = \frac{JRC^{2.5}}{(E/e)^2} \quad [L] \quad (2.38)$$

Ce modèle empirique n'est pas valide pour les fractures caractérisées par des surfaces assez lisses, ou pour une grande ouverture. Pour ces fractures l'ouverture hydraulique (e) est égale à l'ouverture mécanique (E) et:

$$\kappa_f = e^2/12 \quad [L^2] \quad (2.39)$$

où κ_f = perméabilité intrinsèque [L^2]

Pour les premiers dixièmes de mm de déplacement tangentiel, leur modèle s'accordait bien aux résultats expérimentaux, mais, avec l'accroissement du déplacement en cisaillement, ils remarquèrent une nette divergence entre les deux. Le colmatage graduel des vallées et des creux sur les surfaces en cisaillement par du matériel de broyage (Teufel, 1987) pourrait expliquer cette divergence (figure 2.12).

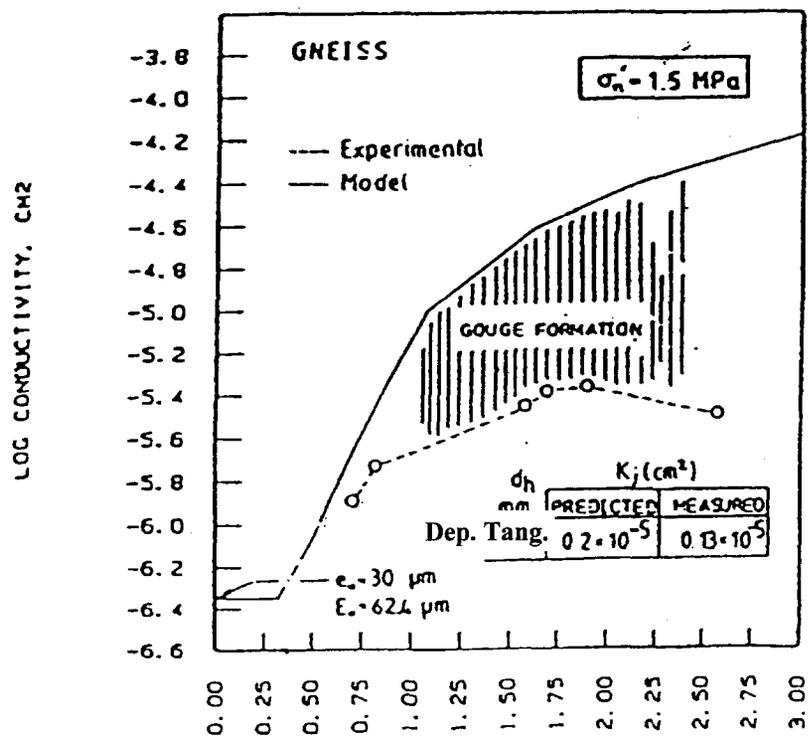


Figure 2.12: Comparaison entre la conductivité hydraulique mesurée et calculée durant le cisaillement d'un joint (tiré de Makurat et al. 1990).

Dans un deuxième temps, ils ont vérifié comment les propriétés de la roche et du joint (JRC, JCS/σ_c (résistance en compression uniaxiale), JCS/σ_n (contrainte normale)), obtenues à partir d'échantillons très différents, pouvaient affecter la perméabilité lors du cisaillement. Les observations relevées ont été les suivantes:

- Les joints dans les roches très résistantes démontrent que des déplacements tangentiels de 2 à 5 mm sont suffisants pour mobiliser la dilatance. Ceci entraîne une augmentation de la perméabilité de 1 à 2 ordres de grandeur. Il est à noter que ces roches ont un rapport élevé de JCS/σ_n et une morphologie des surfaces de joint très rugueuse.

- Une forte minéralisation et un cisaillement répété peuvent réduire la perméabilité des joints même dans les roches très résistantes.

- Les joints dans les roches tendres, malgré une dilatance lors du cisaillement, montrent une diminution de la perméabilité aux déplacements tangentiels de 1 à 5 mm sauf pour les joints qui montrent des valeurs élevées de JRC.

- La formation de matériel de broyage par arasement lors du cisaillement tend à faire diminuer la perméabilité de la fracture. Des valeurs faibles de JRC et du rapport JCS/σ_n semblent favoriser la formation de matériel de broyage.

Olsson (1992), et Olsson et Brown (1993) ont utilisé pour leurs essais un banc de cisaillement rotatif (figure 2.13).

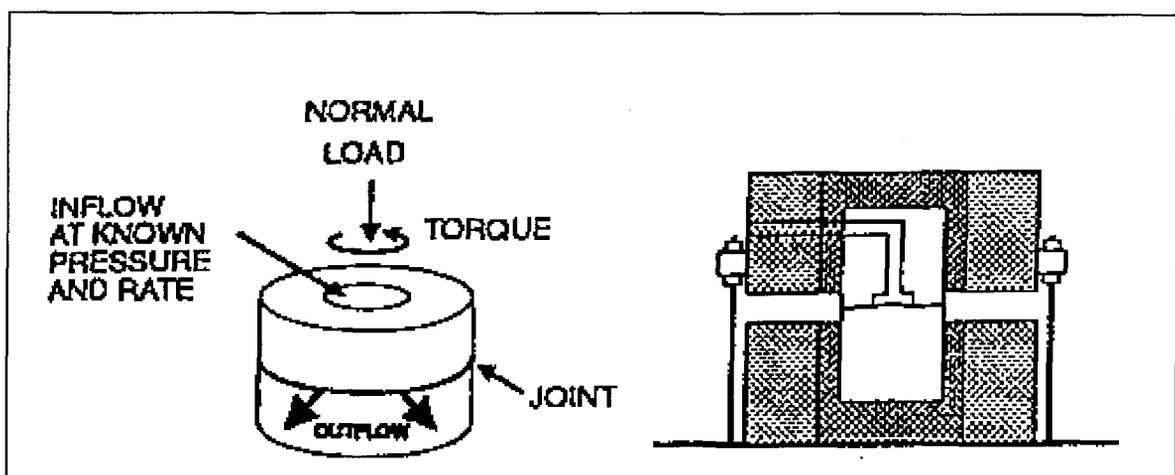


Figure 2.13: Banc de cisaillement rotatif et écoulement radial (tiré de Olsson, 1992).

Le montage hydraulique utilise un écoulement radial divergent. Dans un premier temps, ils ont testé deux échantillons de tuff cimenté. Les surfaces d'un de ces échantillons ont été préalablement traitées au jet de sable afin de les rendre plus rugueuses. L'échantillon lisse a été cisailé avec un déplacement de 14 mm sous 10 MPa de contrainte normale constante alors que celui à surfaces rugueuses a été cisailé avec un déplacement de 12.5 mm sous 5 MPa de contrainte normale constante. Les essais ont été réalisés à pression constante. Les résultats montrent que pour la surface rugueuse, une augmentation du rapport $Q/\Delta P$ (Débit/différentiel de pression) dans les premiers mm de déplacement tangentiel, puis une décroissance lorsque le déplacement en cisaillement se poursuit (figure 2.14). Pour l'échantillon lisse, une décroissance forte du rapport $Q/\Delta P$ est observée pour les premiers mm, puis une décroissance plus faible lorsque le cisaillement se poursuit. Le total de la chute du rapport $Q/\Delta P$, pour un même déplacement tangentiel, est plus important pour la surface rugueuse.

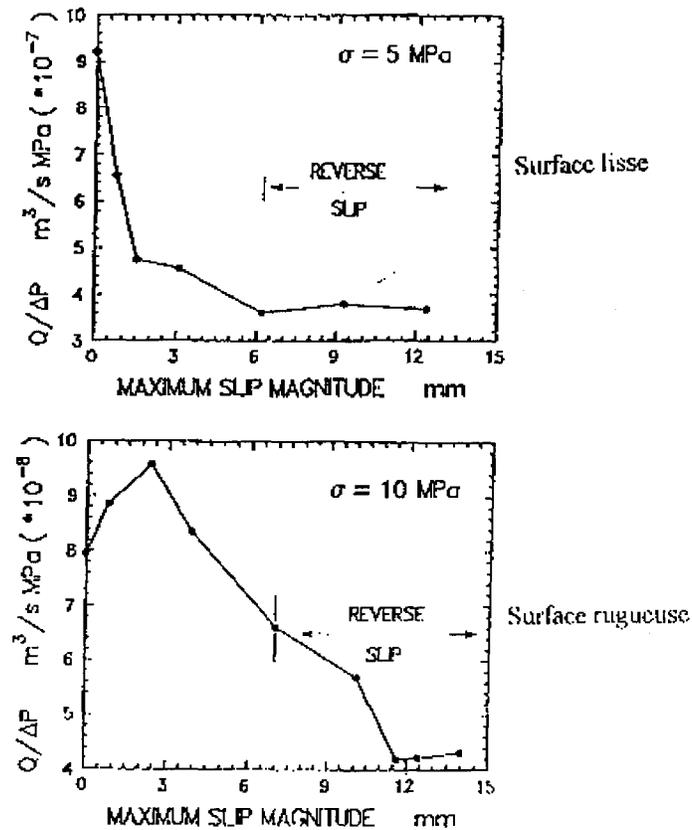


Figure 2.14: Courbes du rapport $Q/\Delta P$ en fonction du déplacement tangentiel pour les échantillons lisse et rugueux (tiré de Olsson, 1992).

Suite à ces essais préliminaires, un joint dans une craie non endommagé et sans apparence de minéralisation a été utilisé. Des mesures hydrauliques ont été effectuées sous conditions initiales (contrainte normale de 8 Mpa, courbe A), après des désemboîtements de 1 mm (contrainte normale de 8 Mpa, courbe B), et de 3 mm (contrainte normale de 8 Mpa, courbe C et D) (figure 2.15) ainsi que pendant un déplacement en cisaillement de 3.5 mm sous 4.3 MPa de contrainte normale constante de la fracture réemboîtée préalablement (figure 2.16).

Pour la fracture emboîtée, le rapport $Q/\Delta P$ reste constant même si la contrainte normale augmente (figure 2.15, courbe A). On peut dire que la fracture est fermée. Pour les deux autres cas (désemboîtement de 1 et 3 mm), une augmentation du rapport $Q/\Delta P$ de la fracture est observée en fonction du degré de désemboîtement et de la valeur de la contrainte normale (figure 2.15, courbe, courbes B C et D). En se basant sur ce rapport de $Q/\Delta P$ en fonction de l'augmentation de la contrainte normale il est démontré qu'une fracture quelque peu désemboîtée (1 à 3 mm) est beaucoup plus propice à l'écoulement qu'une fracture bien emboîtée.

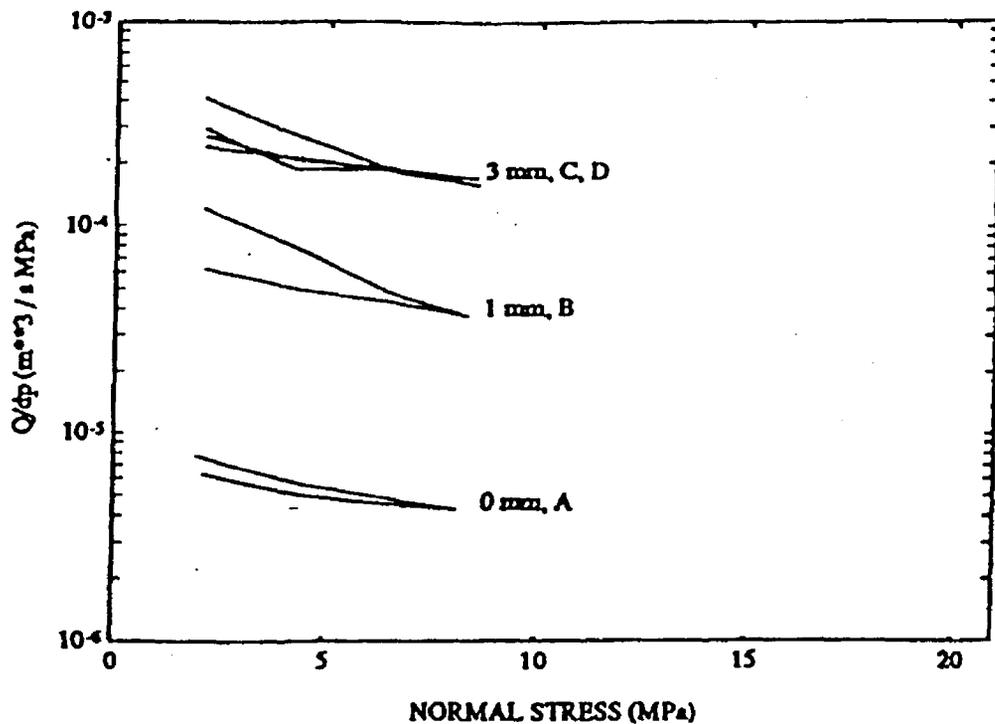


Figure 2.15: Courbes du rapport $Q/\Delta P$ en fonction de la contrainte normale (tiré de Olsson et Brown, 1993).

Le dernier essai montre, que pour un cisaillement de 3.5 mm sous contrainte normale constante de 4.3 MPa, une augmentation du rapport $Q/\Delta P$ (presque 2 ordres de grandeur) et une augmentation de l'ouverture de la fracture (figure 2.16).

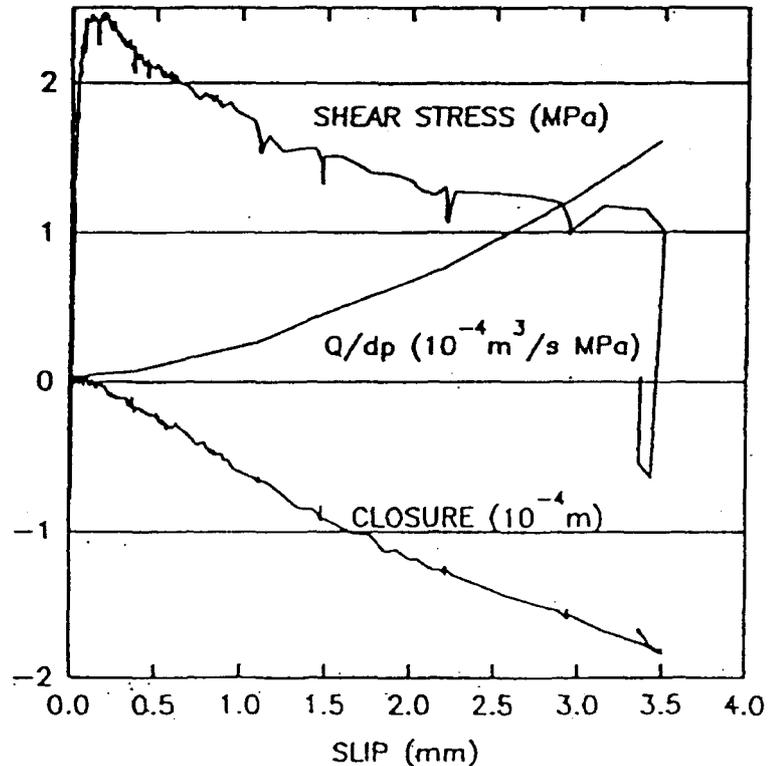


Figure 2.16: Courbes de la contrainte de cisaillement, du rapport $Q/\Delta P$ et de la fermeture de la fracture en fonction du déplacement tangentiel (tiré de Olsson et Brown, 1993).

Suite à ces essais, Olsson et Brown concluent que si les deux surfaces d'une fracture sont initialement bien emboîtées, il y aura probablement une augmentation significative et permanente de la perméabilité avec le déplacement tangentiel. Si cependant, les surfaces sont soit faiblement emboîtées ou désenboîtées, l'effet contraire est observé.

Esaki et al. (1991,1995) ont utilisé pour leurs essais une boîte de cisaillement de forme rectangulaire et, pour les mesures hydrauliques, un écoulement radial divergent (figure 2.17).

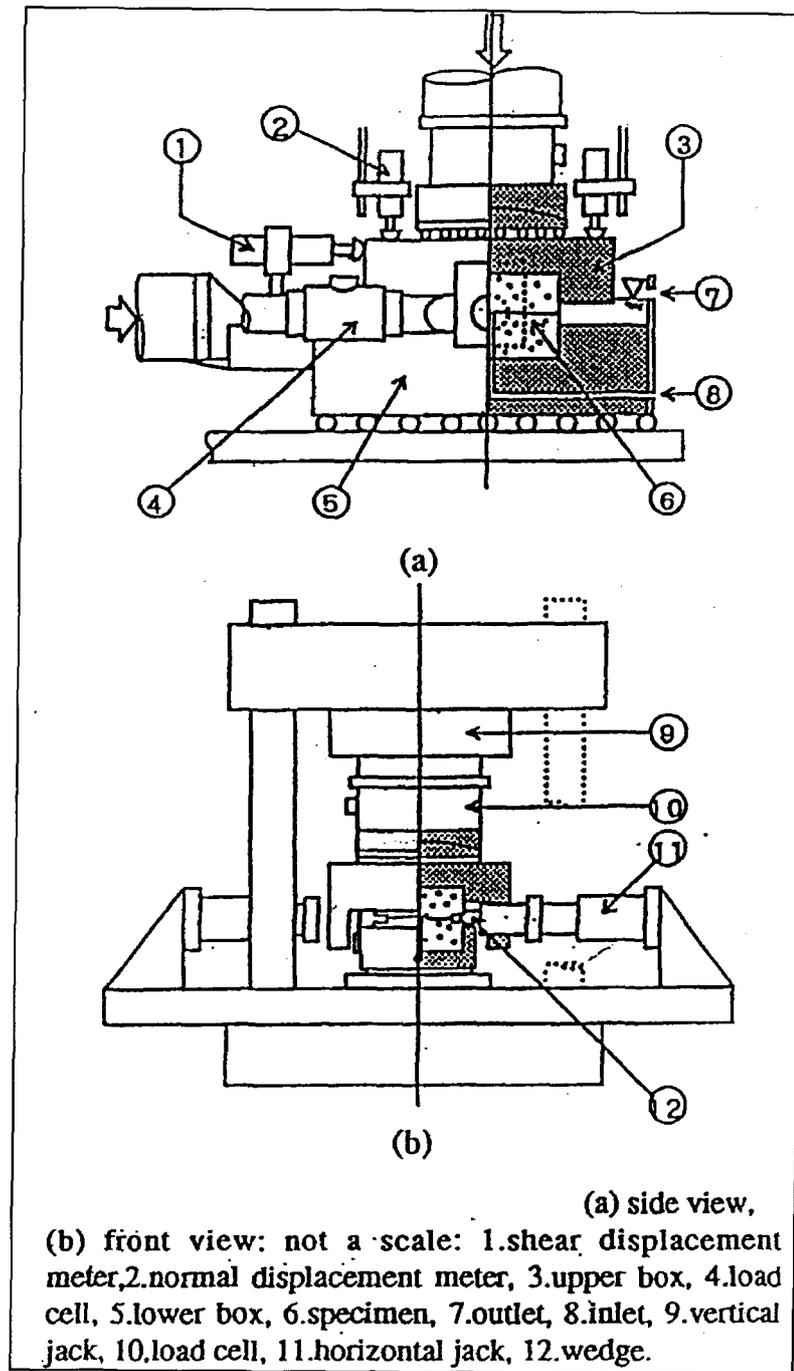


Figure 2.17: Appareil de cisaillement direct (tiré de Esaki et al., 1995).

Ils ont utilisé une fracture induite par fracturation hydraulique dans des échantillons de granite. Des essais de cisaillement, avec un déplacement maximum de 20 mm sous différentes contraintes normales constantes, ont démontré que la perméabilité augmente avec le déplacement tangentiel (figure 2.18). Les contraintes normales utilisées sont 1, 5 et 10 MPa.

Par la suite, les auteurs ont voulu démontrer comment l'histoire du cisaillement d'une fracture peut influencer son comportement hydraulique. Pour simuler un historique de déplacement sur la fracture artificielle de granite, un cisaillement de 12 mm sous contrainte normale constante de 5 MPa suivi d'un retour en position initiale a été imposé. Deux séries d'essais ont été effectués par la suite. Une sur les échantillons ayant subi un historique de déplacement et l'autre sur des échantillons intacts. Ces essais ont démontré que lorsque le cisaillement est effectué sur un échantillon ayant subi un historique de déplacement, on ne remarque plus de pic de cisaillement pour la gamme des contraintes normales utilisées (figure 2.19). Du point de vue hydraulique, la perméabilité des joints avec historique de déplacement est plus faible que celle des joints intacts, laquelle augmente de 1 à 2 ordres de grandeur dans les premiers mm de déplacement en cisaillement.

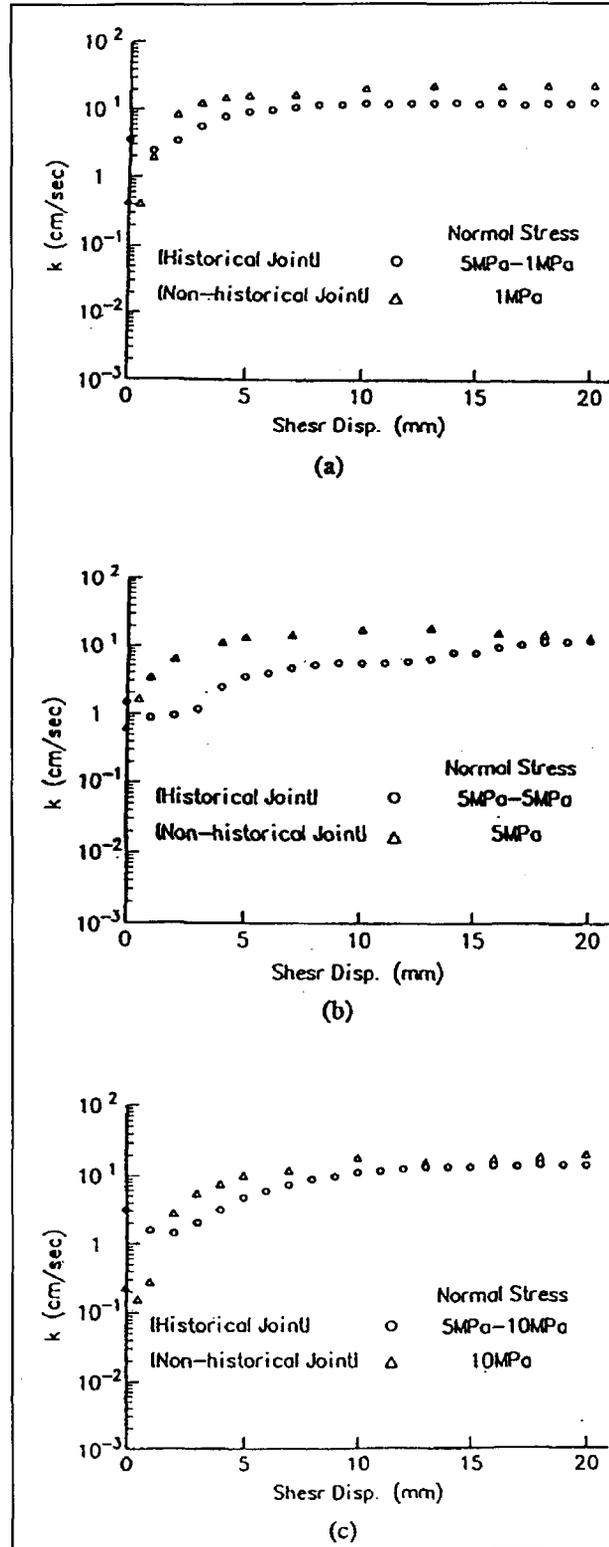


Figure 2.18: Conductivité hydraulique en fonction du déplacement (tiré de Esaki et al., 1995).

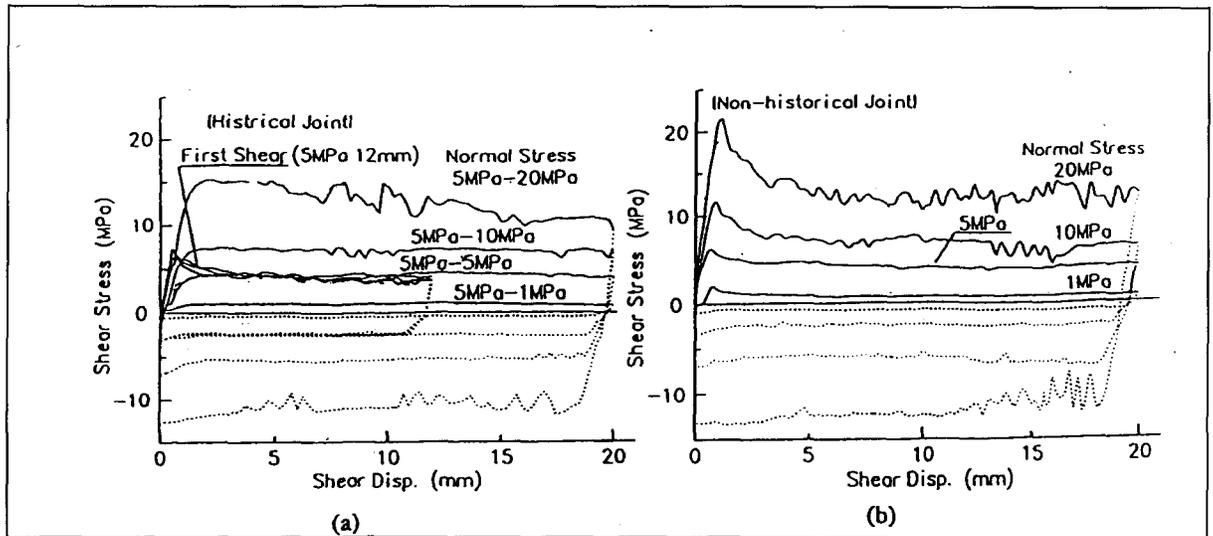


Figure 2.19: Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel; (a) joint avec historique; (b) intact (tiré de Esaki et al., 1995).

Yeo 1997 a effectué des essais hydromécaniques à 0, 1 et 2 mm de déplacement tangentiel (déplacement manuellement) à l'aide de répliques en époxy d'une fracture rocheuse provenant d'un sandstone. La fracture utilisée montre très peu de points de contacts sous la contrainte normale utilisée de 10 KPa. Le nombre de points de contacts et d'aires de contacts diminuent avec le déplacement tangentiel.

Les mesures d'ouvertures faites à l'aide de résine montrent une augmentation avec le déplacement tangentiel. Il est à noter que le matériau des répliques utilisées et la contrainte normale appliquée ne permet pas de dégradation des aspérités. De même, la faible contrainte normale appliquée simule très mal l'ouverture de la fracture sous des conditions réelles de terrain.

Afin d'évaluer l'anisotropie directionnelle de la transmissivité de l'écoulement dans la fracture, l'auteur a utilisé une morphologie de fracture montrant une anisotropie (ondulation) dans une direction préférentielle. Les tests hydrauliques à 0, 1 et 2 mm de déplacement tangentiel montrent qu'avec l'augmentation du cisaillement (cisaillement imposé dans la direction perpendiculaire à l'ondulation de la réplique du sandstone), la fracture devient plus perméable dans la direction parallèle à cette ondulation que dans la direction parallèle à celle du cisaillement imposé. Ce résultat obtenu était tout à fait prévisible étant donné la facilité de formation de vallées ou chenaux entre les ondulations plus prononcées. Yeo (1997) n'a pas tenté de vérifier la situation inverse beaucoup moins prévisible, c'est-à-dire le cisaillement imposé parallèle à l'anisotropie de la morphologie de la surface de la réplique du sandstone.

2.4 Discussion et conclusion

Ces quelques études sur l'hydromécanique d'une fracture en cisaillement ont indiqué les principaux facteurs susceptibles de faire varier la perméabilité en fonction du cisaillement: la dilatance totale et l'évolution du taux de dilatance avec le déplacement en cisaillement, la morphologie des surfaces et des vides, la contrainte normale, le degré initial de fermeture (emboîté ou désemboîté), le matériel de broyage, les propriétés mécaniques et hydrauliques de la roche et du joint. L'importance relative de ces facteurs reste encore à déterminer. C'est avec l'accumulation d'études expérimentales et de simulation qu'il sera possible de quantifier adéquatement chacun des facteurs et de leur accorder leur importance relative.

Un modèle (empirique ou analytique) adéquat ou une simulation numérique du comportement hydraulique de fractures en cisaillement nécessite la caractérisation quantitative des paramètres hydromécaniques mentionnés, le comportement de ces paramètres sous diverses conditions et les relations entre ces paramètres.

De plus, aucune de ces études n'a abordé le comportement de la transmissivité d'une fracture (isotropie ou anisotropie) en fonction de la direction de cisaillement et par rapport aux principales phases du comportement mécanique (mobilisation du frottement, mobilisation de la dilatance, pic de cisaillement, ramollissement post-pic par dégradation des aspérités et phase résiduelle).

En relation avec le comportement hydromécanique en cisaillement de la fracture, l'étude des vides (ouverture de la fracture) ainsi que l'étude de la morphologie et de la dégradation des surfaces ont été presque négligées. Gale et al. (1990) avaient amorcé ces études complémentaires, mais, depuis, aucun autre développement n'a été fait mis à part ceux de Yeo (1997) qui simule des conditions de terrain (faible contrainte normale) et expérimentales (pas de dégradations des aspérités) très restreintes. Ces études complémentaires sont importantes afin de mieux comprendre les variations de la perméabilité de la fracture et aider éventuellement à modéliser un écoulement dans une fracture en cisaillement.

Le nombre très restreint de travaux réalisés sur le comportement de l'écoulement dans les joints en cisaillement entraîne de nombreuses lacunes dans les connaissances sur ce sujet et ce projet vise à accroître les connaissances sur les phénomènes

caractérisant le comportement de l'écoulement. En plus de caractériser et quantifier les paramètres de l'écoulement dans une fracture en cisaillement, le comportement de la transmissivité (isotropie ou anisotropie) sera également quantifié en fonction de la direction de cisaillement, du niveau de contrainte normale appliquée et des différentes phases de comportement mécanique de la fracture soumise au cisaillement.

Une meilleure compréhension de l'écoulement dans la fracture en fonction du cisaillement nécessite une meilleure connaissance de la géométrie de l'espace des vides et des zones de contact ainsi que leur évolution au cours du cisaillement. Ceci se fera à l'aide de la méthode du moulage des vides sous contraintes et par l'analyse des surfaces dégradées en fonction du cisaillement. De ces informations il sera possible de déterminer les réseaux de chenaux probables en fonction du cisaillement.

CHAPITRE 3
MONTAGE EXPÉRIMENTAL

CHAPITRE 3

MONTAGE EXPÉRIMENTAL

3.1 Phases d'étude

Les travaux expérimentaux de cette étude, échelonnés sur deux années, ont été réalisés en deux phases distinctes. La première phase a consisté à mettre au point le montage expérimental par la réalisation de quelques essais. La deuxième phase a consisté à: 1) essayer de remédier aux problèmes rencontrés lors de la première phase et 2) réaliser le programme d'essais planifié. Pour chaque phase, des paires de répliques en mortier (grise et rose), de la fracture originale en granite (annexe 2), ont été fabriquées avec des échantillons témoins.

3.2 Caractérisation du comportement mécanique et hydraulique du matériau d'étude

Les caractéristiques recherchées dans le mortier afin qu'il simule adéquatement le matériau original (granite) étaient les suivantes: 1) une résistance en compression uniaxiale d'environ 80 MPa et 2) une perméabilité de 1×10^{-13} m/s. De plus, une granulométrie entre 0 et 3 millimètres et une prise sans retrait sont des caractéristiques essentielles afin de retrouver la morphologie initiale des surfaces de la fracture. Le mortier retenu a été le traffix (Lanko 711). Une fois la période de durcissement terminée (minimum 30 jours pour ce mortier), les éprouvettes témoins (correspondantes aux épontes grises et roses de chaque

réplique utilisée dans le programme d'essais) ont été soumis à une série de tests donnant les caractéristiques moyennes suivantes (l'annexe 1 présente les résultats complets des essais de caractérisation du mortier):

Année de fabrication	1995				1996			
	Éponte grise		Éponte rose		Éponte grise		Éponte rose	
	Moy.	Écart type						
Vitesse des ondes longitudinales (Vl)	3819 m/s	73.55 m/s	3812 m/s	46.23 m/s	3938 m/s	141.11 m/s	3983 m/s	59.93 m/s
Vitesse des ondes transversales (Vp)	2273 m/s	25.99 m/s	2266 m/s	21.66 m/s	2282 m/s	19.99 m/s	2271 m/s	19.52 m/s
Résistance en compression uniaxiale (Rc)	85,65 MPa	5.77 MPa	85,20 MPa	3.70 MPa	74,6 MPa	8.49 MPa	71,2 MPa	7.25 Mpa
Module de Young	31457 MPa	4460 MPa	29121 MPa	5930 MPa	30123 MPa	2331 MPa	24490 MPa	5392 MPa
Coefficient de poisson	0,25	0,04	0,25	0,04	0,21	0,03	0,20	0,015
Perméabilité (m/s)	5,05 $\times 10^{-13}$	3,31 $\times 10^{-13}$						

De 1995 à 1996, on remarque une diminution d'environ 10% de la résistance du mortier et la baisse du coefficient de Poisson. Cette diminution peut s'expliquer par des lots de mortier différents entre 1995 et 1996. L'analyse granulométrique montre une très bonne répétitivité dans la distribution des grains du mélange de mortier de 1995 et de 1996 (annexe 1), mais la partie fine, qui représente une portion importante, n'a pas été analysée.

De plus ce mortier, très résistant, est composé d'un mélange d'adjuvants qui peut varier quelques peu, dans les lots, d'une année à l'autre.

3.3 Répliques de la fracture de granite

Les échantillons utilisés dans le cadre de cette étude sont des répliques en mortier d'un échantillon de granite contenant une fracture naturelle à mi-hauteur. Ces échantillons sont cylindriques d'un diamètre de 120 mm et sont réalisés à partir de la fracture naturelle déjà utilisée dans le cadre de l'étude mécanique (Flamand et al. 1994) et de l'étude de faisabilité (Gentier et al., 1996).

3.4 Fabrication des répliques

3.4.1 Les travaux antérieurs de pré-faisabilité

Au cours d'une étude de faisabilité préliminaire, C. Petitjean (1994) a établi les procédures à suivre pour effectuer des essais hydromécaniques en cisaillement. Suite à cette étude préliminaire qui démontra la faisabilité de tels essais, des améliorations devaient être apportées au montage expérimental sur les items suivants: 1) la qualité des répliques (déficiences des coaxialités et des cylindricités d'une éponte par rapport à l'autre); 2) la mise en place des deux répliques; 3) le collage des entonnoirs de récupération d'eau; 4) la pression d'injection et le débit versus la dimension des tuyaux de récupération et 5) le niveau des sorties des tuyaux de récupération (effet de siphon).

3.4.2 Adaptation du dispositif de réalisation des répliques aux essais hydromécaniques (phase 1, 1995)

Tel que mentionné précédemment, les quelques problèmes rencontrés lors de l'étude de faisabilité ont été engendrés principalement par le type de réplique utilisé pour les essais de 1994. La réalisation d'un nouveau dispositif de réalisation des répliques a, dans la mesure du possible, éliminé ces problèmes.

Un nouveau dispositif de fabrication des répliques a été retenu dont les composantes sont les suivantes: 1) le porte-négatif; 2) le tube et 3) le support. L'annexe 2 décrit en détail ces composantes.

3.4.3 Moulage en silicone de la fracture à l'aide des porte-négatifs

Cette technique consiste à mouler le négatif de la fracture originale à l'aide d'un porte-négatif et d'une préparation de silicone. (L'annexe 2 décrit les étapes à suivre pour le moulage de la fracture).

3.4.4 Fabrication des répliques en mortier

Le mortier utilisé pour la réalisation de ces répliques est le traffix (Lanko 711). C'est le même mortier qu'a utilisé Flamand (2000) lors des essais mécaniques de 1993-94.

Dans la préparation du mortier, afin de pouvoir mieux distinguer les zones endommagées lors des essais de cisaillement, des colorants (rose et gris) sont ajoutés. Le

colorant rose correspond à l'éponte A alors que le gris correspond à l'éponte B (Photo 3.1). L'annexe 2 décrit plus en détail la fabrication du mortier et la procédure de démoulage. Le vieillissement minimum des répliques est de 30 jours pour qu'elles atteignent les caractéristiques mécaniques optimales.



Photo 3.1 : Épontes rouge et grise d'une réplique.

3.4.5 Fabrication des répliques de la deuxième phase (1996)

Les répliques de la deuxième phase ont été fabriquées de la même façon que celles de la première phase. Cependant des modifications mineures ont été effectuées afin d'optimiser la méthode. L'annexe 2 décrit ces légères modifications et présente les différents paramètres et commentaires de la réalisation des répliques de 1995-1996.

3.5 Préparation des répliques pour les essais hydromécaniques en cisaillement

Avant d'installer les répliques sur le banc d'essai, il faut effectuer une série d'opérations: 1) nettoyage et protection des tubes d'acier contre l'oxydation; 2) surfacage des répliques; 3) forage d'un puits d'injection dans l'éponte inférieure rose; 4) collage d'un tube d'injection dans ce puits; 5) préparation de la surface de mortier non recouverte d'acier; 6) nettoyage des répliques à l'acétone et 7) collage du dispositif des récepteurs en latex. L'annexe 3 décrit en détail chacune de ces étapes. Cette série d'opérations terminée, nous obtenons les répliques adéquates pour les essais hydromécaniques en cisaillement (photo 3.2) comprenant huit secteurs desservie chacun par deux tubes d'évacuation pour le fluide. La nécessité d'utiliser deux tubes pour l'évacuation des fluides est justifié par l'espace disponible entre les deux mâchoires de la machine de cisaillement et les débits d'injection utilisés.

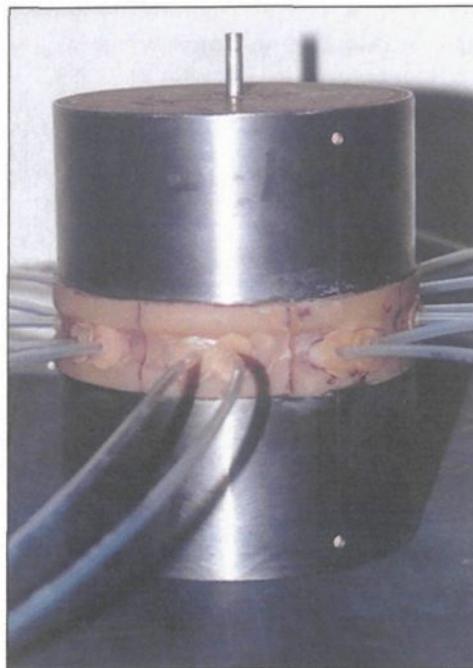


Photo 3.2: Réplique avant le cisaillement

3.6 Description du banc d'essai

Le banc d'essai (photo 3.3), pour les essais hydromécaniques en cisaillement, est composé de la machine de cisaillement, d'une pompe volumétrique ou système d'injection, d'inclinomètres, d'un système de récupération, de capteurs de pression et des systèmes d'asservissement et d'acquisition des données. Le montage expérimental est celui utilisé lors de l'étude de pré-faisabilité (Gentier et al., 1996) auquel quelques modifications ont été apportées notamment au niveau du dispositif de récupération.



Photo 3.3: Banc d'essais

3.6.1 Machine de cisaillement

La machine de cisaillement est constituée (figure 3.1) de deux demi-boîtes (figure 3.1 :7,8) contenant l'échantillon. La demi-boîte inférieure est percée en son centre permettant ainsi l'introduction du dispositif d'injection. Elle est fixée sur le châssis alors que la partie supérieure est entraînée par un vérin horizontal à simple effet (figure 3.1 :1) d'une capacité de 220 KN. Cet ensemble permet d'appliquer directement une contrainte de cisaillement parallèle au joint rocheux. La contrainte normale est appliquée par une embase à rotule fixée sur le piston d'un vérin hydraulique vertical (figure 3.1 :2) d'une capacité de 120 KN, solidaire d'un palonnier (figure 3.1 :3) qui lui permet de suivre l'éponte supérieure de l'échantillon pendant le cisaillement. Le système coulisseau-arbres de guidage permet de maintenir le plan de cisaillement de la machine confondu avec le plan de la fracture durant les essais. La pression dans le vérin horizontal est contrôlée par un groupe électro-hydraulique et une servovalve pilotée par un régulateur (système d'asservissement). La pression normale est fournie par une pompe volumétrique asservie par un moteur à courant continu.

Trois degrés de liberté existent:

- Une translation selon x (direction de cisaillement),
- Une translation selon z (direction normale au cisaillement),
- Une rotation selon y (direction perpendiculaire au cisaillement).

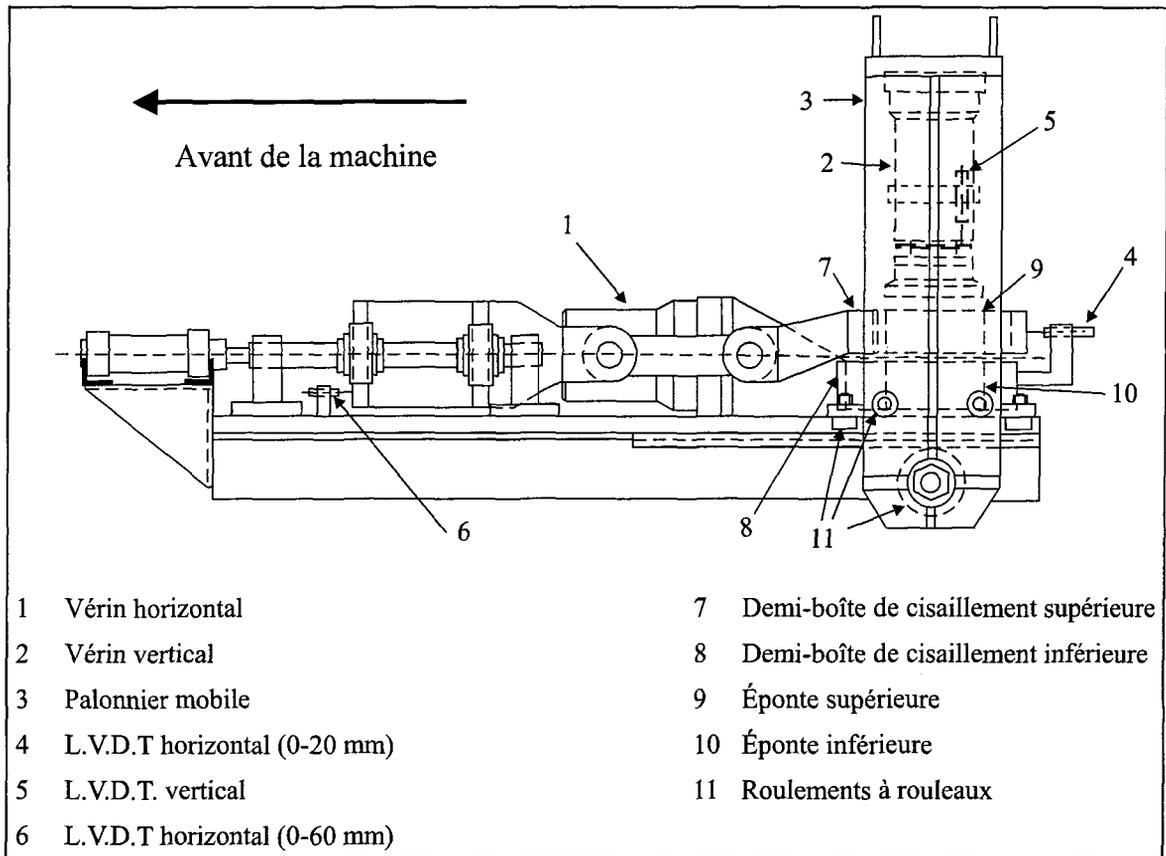


Figure 3.1 : Schéma de la machine de cisaillement

3.6.2 Système de récupération

Un système de récupération est fixé sur la machine de cisaillement par l'intermédiaire de quatre supports. Ce système est composé de huit capteurs de poids disposés radialement sur une plaque d'aluminium (photo 3.4). Des bacs de récupération du fluide reposent sur ces capteurs. Chaque récepteur en latex (secteur) se déverse donc, par les tuyaux de polyamide, dans un bac reposant sur un capteur de force. Ce dispositif assure une mesure en continu du volume de fluide récupéré dans chaque secteur. L'écoulement réalisé est de type radial divergent. Des anneaux de broche d'acier maintenus par des tiges permettent de maintenir,

au même niveau, les tuyaux de récupération. Le nivelage a été fait avant chaque essai à l'aide d'un niveau de précision. Les capteurs de poids sont reliés à une centrale "HP" qui sert d'intermédiaire au système d'acquisition.

3.6.3 Système d'injection du fluide

L'injection de fluide dans la fracture en 1995 se fait par l'intermédiaire d'une pompe volumétrique à haute pression ROP-DT 12421. Les limites de capacité sont de 0 à 1640 cm^3/h , 1000 bars et une régulation possible à débit ou pression constante. La capacité totale est de 0.5 litres.



Photo 3.4 : Système de récupération

Le débit maximum de 1640 cm³/h étant insuffisant pour faire augmenter la pression dans la fracture d'une quantité significative après un cisaillement des épontes de l'échantillon de 0.3 mm, nous avons développé un nouveau système d'injection (photo 3.5). Ce système nous permet d'injecter dans la gamme de débits de 200 à 10000 cm³/h. Par contre, la montée en pression dans la fracture est limitée à 10 bars. Nous avons dû développer ce nouveau système d'injection car il a été impossible de trouver sur le marché un système d'injection adéquat pour la gamme des débits recherchée. L'annexe 4 décrit ce système d'injection plus en détails.

3.6.4 Capteurs de pression

Lors des essais de la première phase (1995), deux capteurs de pression 0-30 bars et 0-5 bars étaient fixés à la base du tuyau d'injection des répliques. Ces capteurs étaient reliés à la même centrale "HP" que le système de récupération. En 1996, ce dispositif a été complété par l'ajout d'un troisième capteur 0-400 mbar afin de mieux vérifier l'évolution des faibles pressions lorsque le déplacement tangentiel était supérieur à 0.3 mm (photo 3.6).

3.6.5 Inclinomètre

Deux inclinomètres ont été positionnés sur la machine de cisaillement permettant d'évaluer, lors du cisaillement, la rotation. L'un évalue la rotation dans la direction parallèle au cisaillement alors que l'autre l'évalue dans la direction perpendiculaire.

3.6.6 Système d'acquisition et de contrôle

Le système d'acquisition et de contrôle permet de cueillir toutes les données des essais hydromécaniques en cisaillement. Pendant les cycles d'écoulement, le débit, la pression et les masses dans les huit capteurs sont enregistrés. De même, pendant les pas de cisaillement, les déplacements normaux et tangentiels, les contraintes normales et tangentielles ainsi que l'inclinaison des inclinomètres sont enregistrés.



Photo 3.5 : Système d'injection

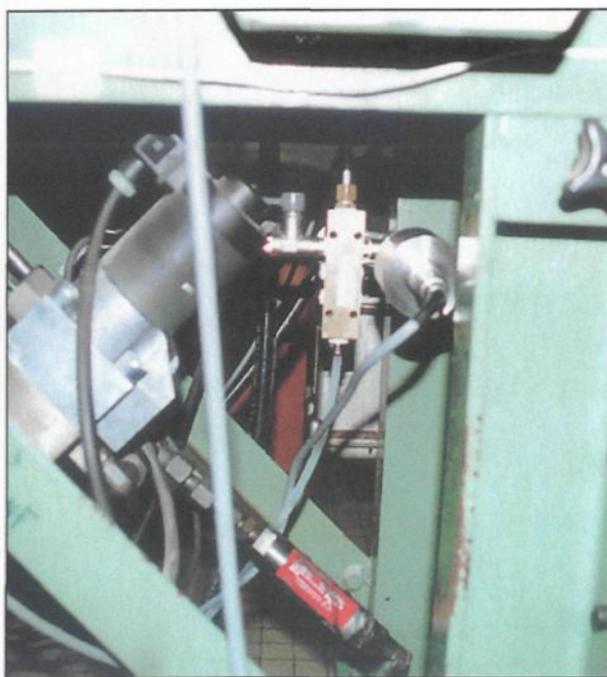


Photo 3.6 : Capteurs de pression

3.7 Mise en place des répliques

Les essais de 1995 n'ont pas subi de mise en place particulière. Suite à l'analyse de ces essais (annexe 12), nous avons, pour les quatre premiers essais de 1996, au palier de contrainte normale de 5 MPa, effectué un essai de fatigue de quelques heures. Ce chargement constant avant essai de 7 MPa entraînait des comportements mécaniques et hydrauliques initiaux différents d'un essai à l'autre. Afin de palier à ce problème, nous avons adopté, pour les autres paliers de contraintes normales de 1996, un processus plus élaboré de mise en place des échantillons. Cette étape devient la première de nos essais. Elle consiste à faire subir aux échantillons des cycles de chargement-déchargement sous contrainte normale afin d'optimiser l'emboîtement (fermeture) de la fracture (Gentier 1986).

Procédure de la mise en place:

- 1 Sous la presse Walter, application de la précharge de 3 KN
- 2 Réalisation de trois cycles de chargement-déchargement croissants (3, 7, 11 MPa) avec retour à la précharge entre les cycles.
- 3 Recommencer les étapes 1 à 2 plusieurs fois sans toucher au montage afin de suivre l'évolution de la fermeture résiduelle irréversible finale.
- 4 Arrêter les cycles de chargement-déchargement quand la fermeture résiduelle irréversible finale devient presque constante (variation de 1 à 2 microns) d'un test à un autre.
- 5 Injection à un 1 l/h, à la contrainte normale retenue pour l'essai et noter la pression correspondante.

6 Transfert de l'échantillon dans la machine de cisaillement et application de la précharge de 3.5 KN

7 Réalisation de trois fois trois cycles de chargement-déchargement croissant (3, 7, 11 MPa) avec retour à la précharge entre les cycles.

8 Injection à un 1 l/h à la contrainte normale retenu pour l'essai et noter la pression correspondante.

9 Comparaison des pressions obtenues sous les deux presses et recommencer à l'étape 7 si l'écart entre les deux pressions obtenues est plus grand que 15%.

Au tableau 3.1, nous présentons pour chaque essai, les résultats des pressions obtenues pour les débits injectés sous la presse Walter et la machine de cisaillement. On note que le faible écart obtenu entre les deux mesures reflète bien que la fermeture de la fracture (calage) n'a pas été changé entre le moment de l'essai sous la presse Walter et celui dans la machine de cisaillement. L'annexe 5 présente les résultats obtenus des fermetures des épontes sous la presse Walter ainsi qu'un exemple de courbes d'essais de déformabilité.

Tableau 3.1: Mise en place des répliques

No essai	Mise en place	Contrainte normale (MPa)	Injection (l/h)	Pression (bars)
2	Presse Walter	7	1	1.8
	Machine de cisaillement	7	1	1.9
4	Presse Walter	7	1	1.5
	Machine de cisaillement	7	1	1.5
5	Presse Walter	7	1	2.1
	Machine de cisaillement	7	1	2.4
9	Presse Walter	7	1	1.9
	Machine de cisaillement	7	1	2.0
11	Presse Walter	3	1	1.3
	Machine de cisaillement	3	1	1.4
12	Presse Walter	3	1	0.9
	Machine de cisaillement	3	1	0.9
13	Presse Walter	3	1	1.2
	Machine de cisaillement	3	1	1.2
15	Presse Walter	3	1	1
	Machine de cisaillement	3	1	1.1
17	Presse Walter	9	1	1.2
	Machine de cisaillement	9	1	1.3
18	Presse Walter	9	1	2.0
	Machine de cisaillement	9	1	2.1
19	Presse Walter	9	1	2.1
	Machine de cisaillement	9	1	2.1
20	Presse Walter	3	1	1.4
	Machine de cisaillement	3	1	1.5

CHAPITRE 4
CARACTÉRISATION DE LA MORPHOLOGIE DES SURFACES DE LA
FRACTURE

CHAPITRE 4

CARACTÉRISATION DE LA MORPHOLOGIE DES SURFACES DE LA FRACTURE

4.1 Introduction

La morphologie des surfaces des fractures rocheuses joue un rôle important dans le comportement mécanique et hydraulique de celle-ci. La mesure de la rugosité est donc nécessaire pour la caractérisation morphologique des surfaces de ces fractures. Dans cette étude, on ne reprendra pas la caractérisation morpho-mécanique déjà traitée dans l'étude de R. Flamand (2000), mais essayer d'adapter cette analyse morphologique à l'écoulement de fluide (eau) dans la fracture. De plus, afin de bien caractériser la surface de la fracture, quelques paramètres de l'analyse de la morphologie sont évalués.

Dans la première partie de ce chapitre, une brève description de l'appareil utilisé pour l'acquisition des profils topographiques est effectuée, suivie de la présentation du plan d'échantillonnage des profils. Puis, une caractérisation de la surface de la fracture est réalisée par l'intermédiaire de quelques paramètres statistiques des hauteurs des aspérités. Un parallèle sera fait entre ces paramètres et la reproductibilité des répliques. Enfin, une modélisation des épontes de la fracture étudiée avant cisaillement sera effectuée à l'aide du krigeage.

Il est à noter que la morphologie des surfaces de la fracture étudiée a été caractérisée seulement pour la deuxième phase de cette étude (programme d'essais de 1996).

4.2 Morphologie des surfaces de la fracture

Les surfaces des fractures montrent un assemblage d'aspérités différentes appelé rugosité en mécanique des roches. Selon Patton (1966), la rugosité peut être considérée à plusieurs échelles:

- 1) à l'échelle de la texture de la roche (les aspérités sont de faibles tailles et reliées à la composition minéralogique de la roche);
- 2) à l'échelle centimétrique (les aspérités sont de plus grandes amplitudes et constitue la rugosité de second ordre;
- 3) à l'échelle décimétrique (les surfaces présentent des ondulations d'amplitudes centimétriques et constituent la rugosité de premier ordre).

Cette classification a été reprise par différents auteurs (Kana et al., 1996) qui ont utilisés ces concepts d'aspérités secondaires et primaires (figure 4.1) correspondant respectivement aux catégories 2 et 3 de Patton (1966).

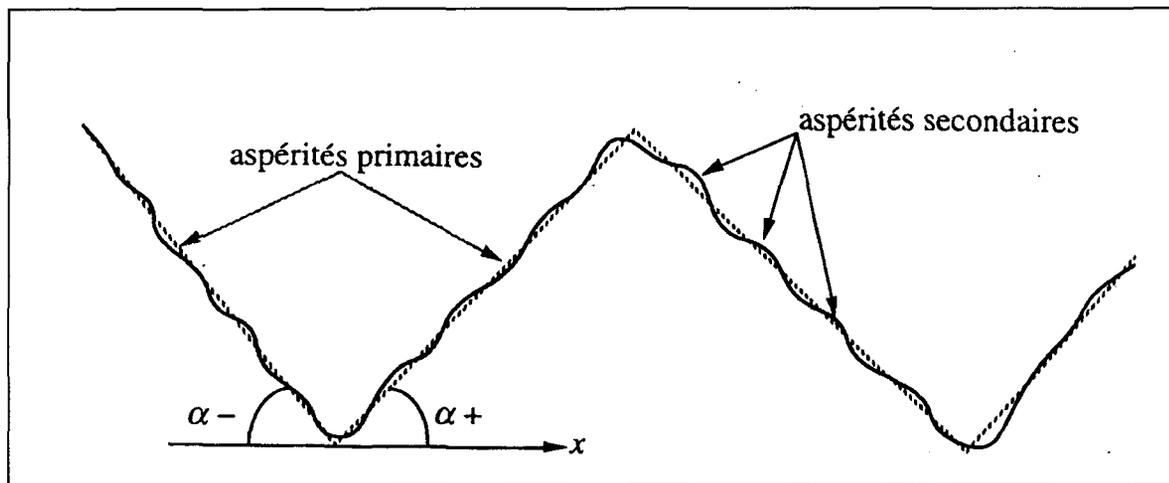


Figure 4.1: Concept d'aspérités primaires et secondaires (adapté à partir de Kana et al., 1996).

4.3 Acquisition des profils à l'aide du rugosimètre

Les profils des aspérités utilisés dans cette étude ont été enregistrés à l'aide d'un rugosimètre de laboratoire (photo 4.1). Le rugosimètre de laboratoire est un appareil qui permet de relever la trace de profils (2 dimensions) à l'aide d'un stylet qui se déplace sur la surface de la fracture. Les données recueillies sont contenues dans le plan X-Z. L'axe X est la direction d'enregistrement alors que l'axe Z correspond à la hauteur des aspérités. L'axe Y, perpendiculaire à l'axe X, permet de localiser la position des profils.

Le rugosimètre de laboratoire est composé d'un bâti fixe sur lequel un chariot mobile peut se déplacer dans deux directions horizontales (X et Y). A la base du chariot mobile, on retrouve un fléau à l'extrémité duquel est fixé perpendiculairement un stylet (pointe conique) qui glisse à la surface des aspérités des fractures rocheuses. Il est à noter que, pour

que la pointe du stylet puisse suivre la topographie de la fracture, il faut que la fixation du fléau au chariot mobile permette la rotation de celui-ci. Le déplacement du chariot suivant l'axe X se fait par l'intermédiaire d'une vis sans fin actionnée manuellement. Une tige avec des crans d'arrêts fixes et réguliers permet le déplacement selon l'axe Y et par le fait même, l'enregistrement de plusieurs profils parallèles. Les données enregistrées lors de l'acquisition d'un profil proviennent de deux capteurs de déplacements LVDT. Un capteur dans la position horizontale qui permet de mesurer le déplacement du chariot selon l'axe X. Un capteur dans la position verticale positionnée sur le chariot, au centre du fléau quand ce dernier est en position horizontale, qui permet de mesurer les déplacements du fléau selon l'axe Z. Ces capteurs de déplacements sont reliés à la centrale d'acquisition des données. Cette centrale, à l'aide d'un programme approprié calcule en continue la position de l'extrémité du stylet selon les axes X et Z. Puis, une fois les enregistrements du profil terminé, le programme calcule de nouveau les coordonnées selon les axes X et Z à un pas d'enregistrement constant (0,5 mm pour cette étude). Cette manipulation (données à des pas variables vers des données à un pas fixe) permet un traitement plus facile des données.

Un nouveau boîtier a été usiné afin d'adapter le rugosimètre aux échantillons utilisés. Ce boîtier (photo 4.2) permet à l'échantillon de bien reposer au fond et d'être bien centré par l'intermédiaire de trois vis en triangle. Deux de ces vis sont fixes et l'autre libre. Il suffit de serrer la vis libre jusqu'à ce que l'échantillon butte contre les deux autres vis. Finalement, un trou fileté avec vis permet le repérage de l'échantillon par rapport au pion (photo 4.2).

4.4 Plan de l'échantillonnage des profils

Afin de maintenir une base de comparaison avec des études antérieures similaires, nous avons décidé de reprendre les mêmes localisations de profils que celles des études de Flamand (2000).

Cependant, à cause de la présence du trou de forage dans nos répliques inférieures (roses), les profils qui passaient par le centre pour les deux épontes ont été abandonnés au profit d'autres profils se situant de chaque côté du trou (figure 4.2).

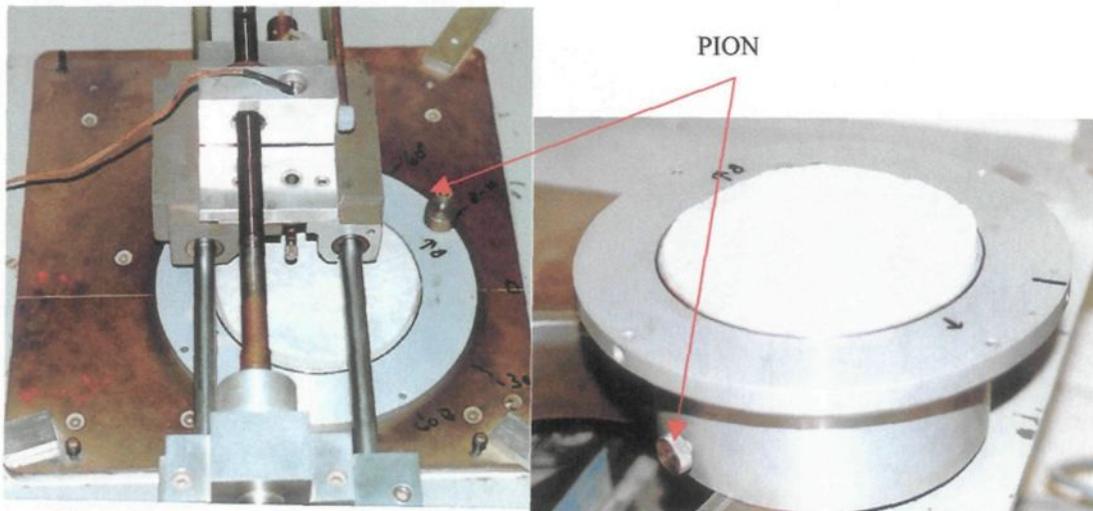


Photo 4.1: Rugosimètre de laboratoire.

Photo 4.2: Boîtier avec épontes.

Il faut noter aussi que les profils de nos épontes sont plus longs que ceux de Flamand (2000) étant donné qu'on utilise un échantillon d'un diamètre de 120 mm en comparaison

de 90 mm pour les études de Flamand. Ce diamètre de 120 mm nous a amené à tracer de nouveaux profils aux extrémités des répliques (figure 4.2).

Le sens d'enregistrements des profils correspond au sens de déplacement du stylet à la surface de l'éponte lors de l'acquisition des données. Ce sens de déplacement du stylet est le même que celui de l'éponte opposée au cours des essais de cisaillement. Par exemple, si un profil est enregistré sur une réplique A (rose), le sens de déplacement du stylet est alors le même qu'a été celui de l'éponte B (grise) au cours de l'essai de cisaillement. Cette convention de sens a été maintenue pour tous les profils lors de cette étude et suit la même convention que les travaux de Flamand (2000).

La figure 4.2 montre la localisation des 37 profils de chaque réplique (rose et grise) selon 4 directions. Les directions 0 (-30°), 1 (0°), 4 (60°) et 5 (90°) comportent 8 profils numérotés de gauche à droite. Cinq profils supplémentaires ont été insérés dans les directions 0 (-30°), 4 (60°) et 5 (90°). Ces profils sont numérotés par le chiffre 9 ou la lettre A.

La figure 4.3 résume l'emplacement de tous les profils et les crans d'arrêt correspondant sur le rugosimètre de laboratoire. Sur cette figure, 0 mm représente le centre de l'échantillon. Les signes négatifs représentent la gauche de l'échantillon.

Le programme d'enregistrement des profils comprend, avant cisaillement, les enregistrements des 74 profils (37 sur chaque éponte) sur la fracture originale et sur chacune des 20 paires de répliques (répliques fabriquées pour la deuxième phase de ce projet). Il comprend aussi l'enregistrement, après cisaillement, des 74 profils sur chacune des 16 répliques servant aux essais hydromécanique en cisaillement.

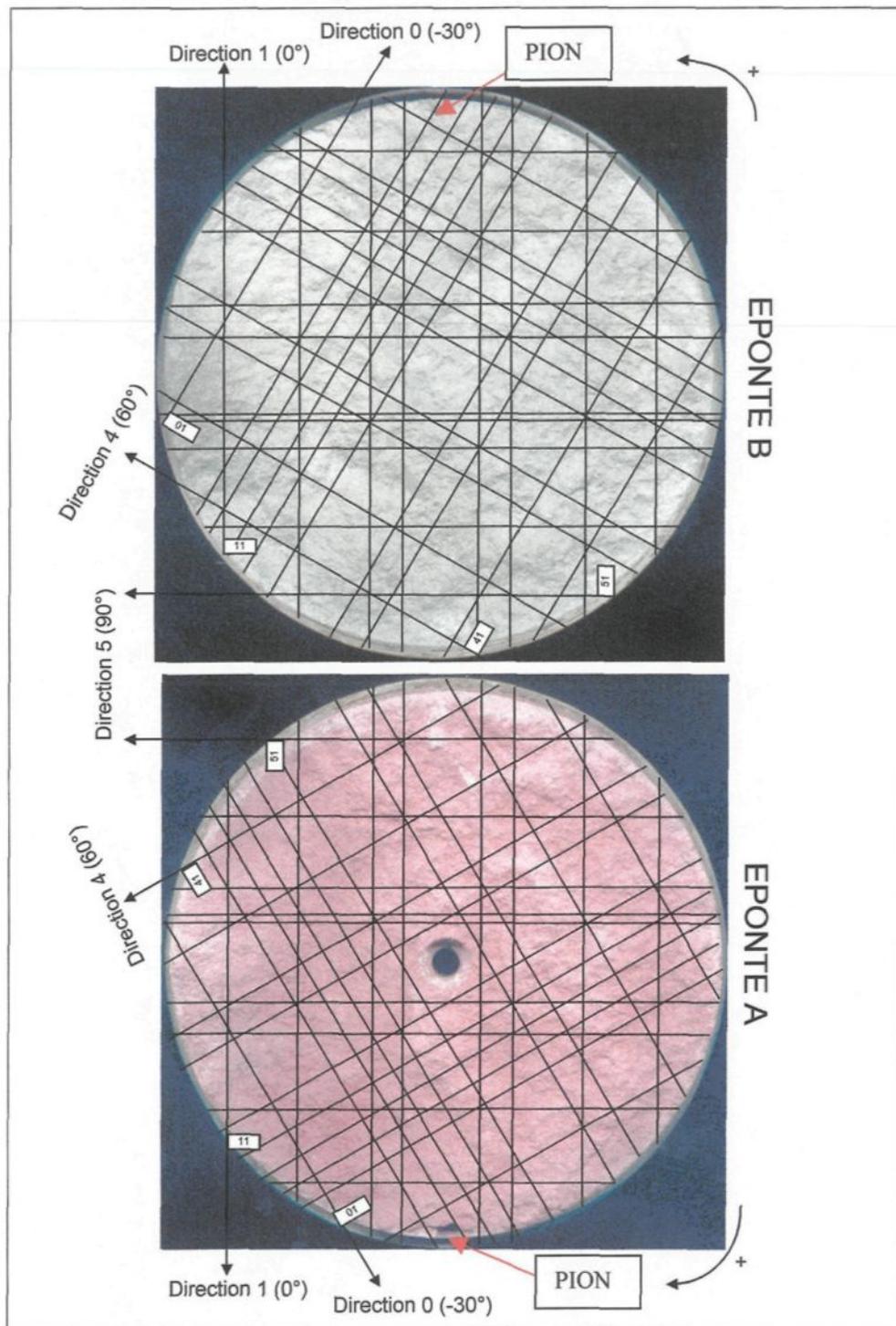


Figure 4.2: Plan de l'échantillonnage des profils sur les deux épontes (vue de dessus)

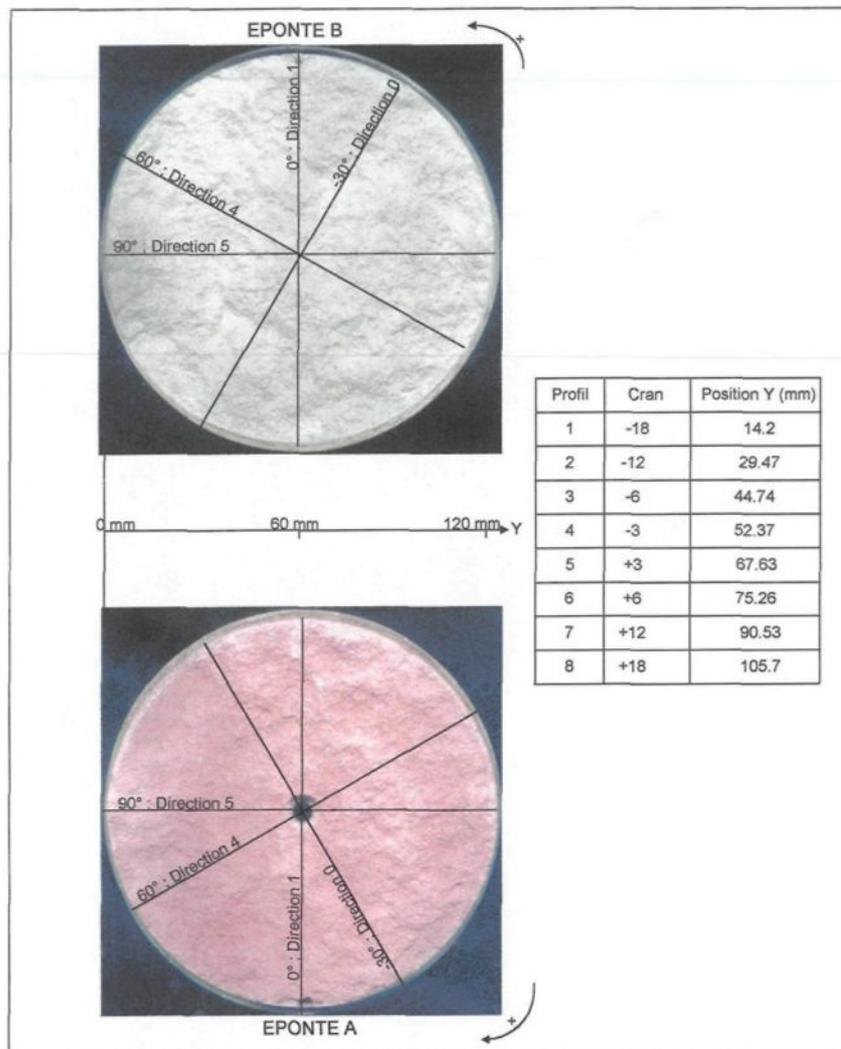


Figure 4.3: Résumé de l'emplacement des profils avec les crans correspondants du rugosimètre (vue de dessus).

4.5 Caractérisation des surfaces de la fracture

Afin de bien caractériser la fracture étudiée, nous avons calculé quelques paramètres de rugosité et effectué l'analyse statistique des hauteurs des aspérités.

4.5.1 Paramètres de rugosité

La rugosité linéaire R_L (Chermant et Coster, 1983) est le rapport de la longueur vraie (L_t) de la ligne de fracture et de sa projection sur une droite de référence arbitraire (L) (figure 4.4).

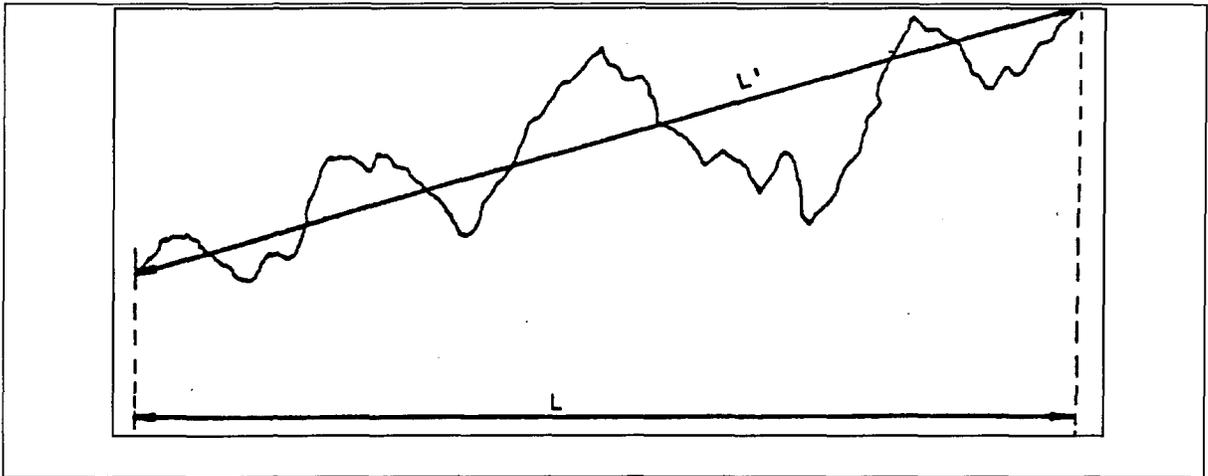


Figure 4.4: Définition des indices de rugosité linéaire R_L . Tiré de Coster et Chermant (1983).

$$R_L = \frac{L_t}{L} \quad (4.1)$$

Le paramètre Z_2 (Gentier 1986) correspond à une moyenne quadratique de la pente des éléments du profil définis par le pas Δx . Donc Z_2 est la racine carrée de la moyenne quadratique de la dérivée première de $z(x)$:

$$z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Le Z_4 (Gentier 1986) correspond à un paramètre directionnel pour l'étude du comportement en cisaillement. Mathématiquement, il correspond à la proportion soit positive soit négative non compensée sur la longueur L du profil:

$$z_4 = \frac{\sum (x_i)_{positif} - \sum (x_i)_{négatif}}{L} \quad (4.3)$$

4.5.2 Résultats pour l'ensemble des répliques par profil indépendant avant cisaillement

L'indice de rugosité linéaire (R_L) et les deux coefficients (z_2 et z_4) sont calculés à partir de la moyenne des valeurs obtenues de chaque profil de l'ensemble des répliques.

Le tableau 4.1 compile les résultats des paramètres moyens R_L , Z_2 et Z_4 obtenus pour tous les profils (4 directions d'enregistrements de l'éponte A) de la fracture originale et des répliques. Les profils sont identifiés de la façon suivante:

- L; identifie que le profil a été enregistré avec le rugosimètre de laboratoire;
- 0; le premier chiffre de l'extension indique la direction d'enregistrement du profil;
- 1; le second chiffre de l'extension indique le numéro du profil.

Les valeurs de ces paramètres pour l'éponte B (non présentés dans cette étude) sont très similaires à ceux de l'éponte A. Pour la position de ces profils par rapport à l'éponte A, se référer à la figure 4.2.

Tableau 4.1: Paramètres R_L , Z_2 et Z_4 pour la fracture originale et les répliques par profil indépendant. (L0 = direction -30° ; L1 = direction 0° ; L4 = direction 60° ; L5 = direction 90°) (1 à A = numérotation des profils).

NO de profil	Répliques 1 à 20						Fracture originale		
	RL		Z2		Z4		RL	Z2	Z4
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type			
L01	1,030	0,0011	0,249	0,005	0,174	0,034	1,028	0,243	0,179
L02	1,038	0,0011	0,280	0,010	-0,148	0,028	1,039	0,286	-0,102
L03	1,037	0,0010	0,280	0,004	-0,217	0,018	1,038	0,284	-0,241
L04	1,040	0,0009	0,291	0,004	-0,126	0,029	1,040	0,291	-0,109
L05	1,037	0,0009	0,283	0,003	-0,112	0,026	1,037	0,283	-0,101
L06	1,034	0,0012	0,267	0,004	-0,016	0,026	1,035	0,273	0,004
L07	1,034	0,0009	0,269	0,004	-0,064	0,023	1,037	0,279	-0,038
L08	1,027	0,0011	0,235	0,004	-0,124	0,042	1,029	0,245	-0,222
L09	1,030	0,0012	0,250	0,006	-0,218	0,034	1,029	0,249	-0,195
L0A	1,033	0,0012	0,261	0,005	-0,248	0,025	1,030	0,251	-0,235
L11	1,042	0,0009	0,297	0,003	-0,053	0,039	1,042	0,300	-0,075
L12	1,029	0,0012	0,245	0,005	0,038	0,028	1,030	0,250	0,018
L13	1,026	0,0007	0,232	0,002	0,033	0,021	1,026	0,232	0,012
L14	1,043	0,0019	0,306	0,008	-0,029	0,016	1,044	0,314	-0,046
L15	1,027	0,0012	0,238	0,006	-0,006	0,029	1,027	0,239	-0,002
L16	1,042	0,0017	0,300	0,007	-0,015	0,034	1,042	0,303	0,005
L17	1,027	0,0014	0,242	0,007	-0,100	0,025	1,027	0,242	-0,101
L18	1,038	0,0013	0,282	0,006	-0,053	0,032	1,039	0,286	-0,013
L41	1,033	0,0009	0,264	0,003	0,134	0,030	1,034	0,269	0,125
L42	1,043	0,0012	0,305	0,004	-0,147	0,024	1,044	0,308	-0,105
L43	1,030	0,0010	0,249	0,004	-0,014	0,020	1,029	0,246	-0,013
L44	1,031	0,0007	0,256	0,003	0,010	0,033	1,033	0,264	0,041
L45	1,032	0,0010	0,259	0,004	0,069	0,018	1,032	0,258	0,115
L46	1,036	0,0010	0,275	0,004	0,089	0,024	1,036	0,275	0,093
L47	1,041	0,0013	0,296	0,004	0,255	0,036	1,044	0,305	0,283
L48	1,038	0,0020	0,286	0,009	0,093	0,036	1,039	0,291	0,106
L49	1,029	0,0012	0,246	0,006	0,112	0,024	1,030	0,251	0,134
L4A	1,037	0,0011	0,279	0,004	0,192	0,023	1,037	0,277	0,200
L51	1,038	0,0012	0,287	0,005	0,188	0,027	1,038	0,286	0,148
L52	1,028	0,0005	0,242	0,003	0,134	0,036	1,029	0,245	0,204
L53	1,034	0,0006	0,268	0,003	0,009	0,029	1,034	0,266	-0,003
L54	1,034	0,0009	0,266	0,003	-0,020	0,025	1,034	0,266	-0,063
L55	1,039	0,0007	0,294	0,003	0,023	0,022	1,040	0,297	0,029
L56	1,041	0,0007	0,298	0,003	0,109	0,025	1,044	0,307	0,111
L57	1,033	0,0007	0,261	0,003	0,174	0,019	1,033	0,261	0,140
L58	1,035	0,0007	0,273	0,003	0,104	0,023	1,037	0,278	0,115
L59	1,030	0,0015	0,252	0,006	0,053	0,032	1,031	0,254	0,085

4.5.3 Analyse statistique des hauteurs des aspérités

La description se fait en termes de fonctions de densité de probabilité et de fonctions de répartition empiriques (histogrammes) de la hauteur z des profils.

Les distributions sont caractérisées par les paramètres classiques suivants:

$$\text{la moyenne } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.4)$$

$$\text{la variance } \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.5)$$

On généralise la notion de moment centré d'ordre p sous la forme:

$$m_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^p \quad (4.6)$$

À partir de laquelle on définit des coefficients adimensionnels par:

$$a_p = \frac{m_p}{\sigma^p} \quad (4.7)$$

Les coefficients les plus couramment utilisés sont ceux dérivant des moments centrés d'ordre 3 et 4:

a_3 = coefficient de dissymétrie;

a_4 = coefficient d'aplatissement.

Le coefficient a_3 correspond au degré de symétrie d'une distribution. Pour une distribution parfaitement symétrique comme la loi Normale, le coefficient a_3 est nul.

Le coefficient a_4 mesure le degré d'aplatissement d'une distribution. La notion d'aplatissement concerne la concentration des fréquences autour du mode, la loi Normale étant habituellement prise comme référence. Pour la loi Normale centrée réduite, le coefficient d'aplatissement a_4 est égal à 3. Si le coefficient d'aplatissement est supérieur à 3, on dit que la distribution est à forte concentration (ou leptocurtique), si le coefficient est inférieur à 3, elle est dite à faible concentration (ou platicurtique).

4.5.4 Résultats des coefficient a_3 et a_4 par profil indépendant

Afin de bien caractériser la fracture étudiée par profil indépendant, les coefficients a_3 et a_4 de l'ensemble des répliques et de la fracture originale ont été compilés pour l'éponte A (tableau 4.2).

Les coefficients a_3 sont presque toujours négatifs pour les profils dans les directions 4 et 5. Dans les deux autres directions (0 et 1), ils sont autant négatif que positif.

Les coefficients d'aplatissement a_4 sont pour la plupart inférieurs à 3, indiquant des distributions à faible concentration. Seuls les profils L48 et L51 ont un coefficient nettement supérieur à 3.

4.5.5 Résultats des coefficient a_3 et a_4 par direction et les histogrammes des hauteurs.

Pour la fracture originale et la réplique 06 (éponge A), des histogrammes moyens par direction (0, 1, 4, 5) ainsi qu'un histogramme moyen global ont été compilés et sont présentés aux figures 4.5 et 4.6. Ces histogrammes présentent une tendance bimodale. Les résultats des compilations des coefficients a_3 et a_4 pour la fracture originale et les répliques 06 et 07 sont présentés au tableau 4.3.

Il en ressort que:

- les valeurs obtenues pour l'éponge A sont similaires à celles de l'éponge B;
- le coefficient d'asymétrie est toujours négatif (pour l'éponge A) traduisant une dissymétrie des distributions avec un étalement à gauche;
- l'éponge B montre exactement le comportement contraire;
- le coefficient d'aplatissement est nettement inférieur à 3 (pour les éponges A et B) traduisant des distributions à faible concentration.

Cette approche statistique des hauteurs à l'échelle globale de la surface de la fracture caractérise très bien celle-ci et laisse supposer l'existence de plusieurs structures dont la

hauteur est nettement supérieure à la taille moyenne des grains et qui se traduit par une tendance à la bimodalité des distributions.

Tableau 4.2: Paramètres a_3 et a_4 pour la fracture originale et les répliques par profil indépendant. (L0 = direction -30° ; L1 = direction 0° ; L4 = direction 60° ; L5 = direction 90°) (1 à A = numérotation des profils).

N0 de profil	Répliques 1 à 20				Fracture originale	
	a_3		a_4		a_3	a_4
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type		
L01	1,10	0,03	2,67	0,07	1,18	2,89
L02	0,76	0,01	3,06	0,03	0,76	3,08
L03	-0,22	0,01	1,85	0,03	-0,19	1,77
L04	-0,49	0,24	1,99	0,03	-0,54	1,96
L05	-0,52	0,03	2,06	0,06	-0,52	2,02
L06	-0,20	0,01	1,83	0,01	-0,18	1,84
L07	-0,07	0,03	2,10	0,02	-0,04	2,05
L08	0,79	0,02	2,53	0,03	0,81	2,56
L09	0,07	0,01	2,01	0,01	0,10	1,98
L0A	0,20	0,02	2,47	0,01	0,26	2,45
L11	-0,09	0,06	2,01	0,07	-0,02	1,93
L12	-0,11	0,15	2,74	0,16	-0,16	2,85
L13	0,43	0,08	2,50	0,03	0,35	2,47
L14	0,29	0,03	3,22	0,04	0,28	3,30
L15	-0,24	0,05	2,72	0,10	-0,32	2,84
L16	-0,06	0,05	2,05	0,15	-0,07	1,98
L17	0,23	0,03	2,03	0,02	0,26	1,96
L18	-0,45	0,03	2,02	0,06	-0,43	2,01
L41	-0,43	0,01	1,71	0,01	-0,41	1,68
L42	-0,01	0,04	2,06	0,08	0,00	2,12
L43	-0,32	0,02	1,59	0,04	-0,33	1,57
L44	-0,16	0,01	1,43	0,01	-0,16	1,44
L45	-0,60	0,01	2,04	0,01	-0,59	2,05
L46	-0,69	0,00	1,97	0,01	-0,68	1,96
L47	-0,76	0,02	2,97	0,06	-0,73	2,96
L48	-0,86	0,08	4,01	0,24	-0,84	3,94
L49	-0,61	0,01	2,06	0,02	-0,61	2,08
L4A	-0,40	0,01	2,15	0,02	-0,40	2,18
L51	-1,60	0,02	4,62	0,08	-1,62	4,71
L52	-0,69	0,01	2,24	0,02	-0,69	2,24
L53	-0,45	0,01	1,83	0,02	-0,47	1,86
L54	-0,68	0,01	2,37	0,03	-0,68	2,39
L55	-0,35	0,01	1,82	0,02	-0,37	1,81
L56	-0,10	0,01	1,70	0,01	-0,10	1,71
L57	-0,36	0,01	1,56	0,01	-0,36	1,56
L58	-0,42	0,01	1,92	0,02	-0,43	1,95
L59	-0,62	0,01	2,14	0,02	-0,64	2,17

Tableau 4.3: Résultats des coefficients a_3 et a_4 (par direction et total) pour la fracture originale et les répliques 6 et 7.

Éponte A

N0 de direction	Répliques				Fracture originale	
	No 6		No 7		a_3	a_4
	a_3	a_4	a_3	a_4		
0	-0,348	2,032	-0,347	2,045	-0,336	2,026
1	-0,447	2,442	-0,428	2,469	-0,406	2,479
4	-0,448	2,049	-0,435	2,033	-0,425	2,07
5	-0,521	2,269	-0,514	2,279	-0,497	2,276
Total	-0,443	2,176	-0,433	2,187	-0,421	2,191

Éponte B

N0 de direction	Répliques				Fracture originale	
	No 6		No 7		a_3	a_4
	a_3	a_4	a_3	a_4		
0	0,343	1,993	0,34	1,982	0,331	1,962
1	0,398	2,359	0,422	2,31	0,414	2,31
4	0,423	2,073	0,425	2,048	0,425	2,061
5	0,5	2,262	0,493	2,225	0,489	2,226
Total	0,426	2,167	0,425	2,131	0,422	2,132

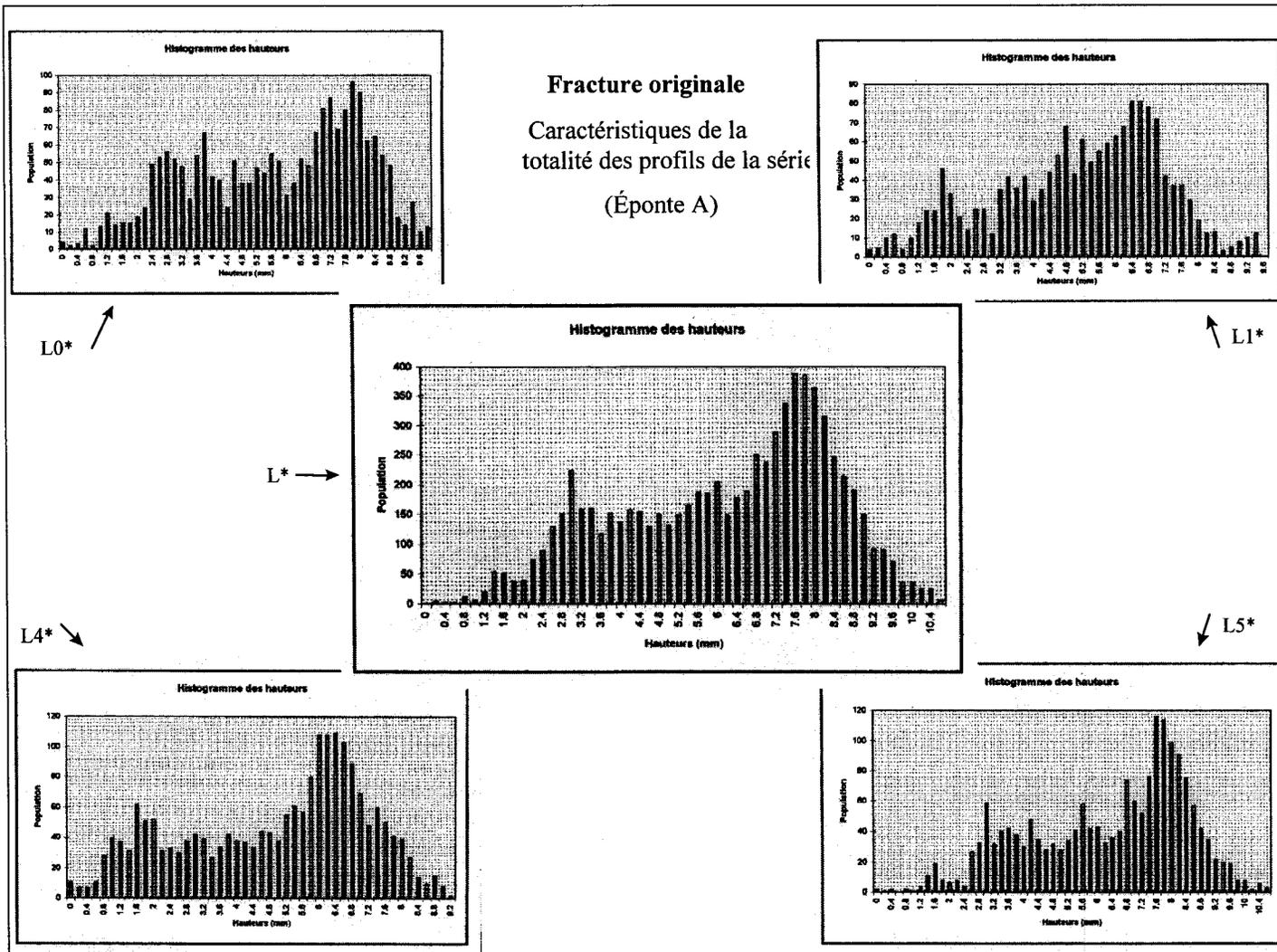


Figure 4.5: Histogrammes des distributions des hauteurs de la fracture originale.

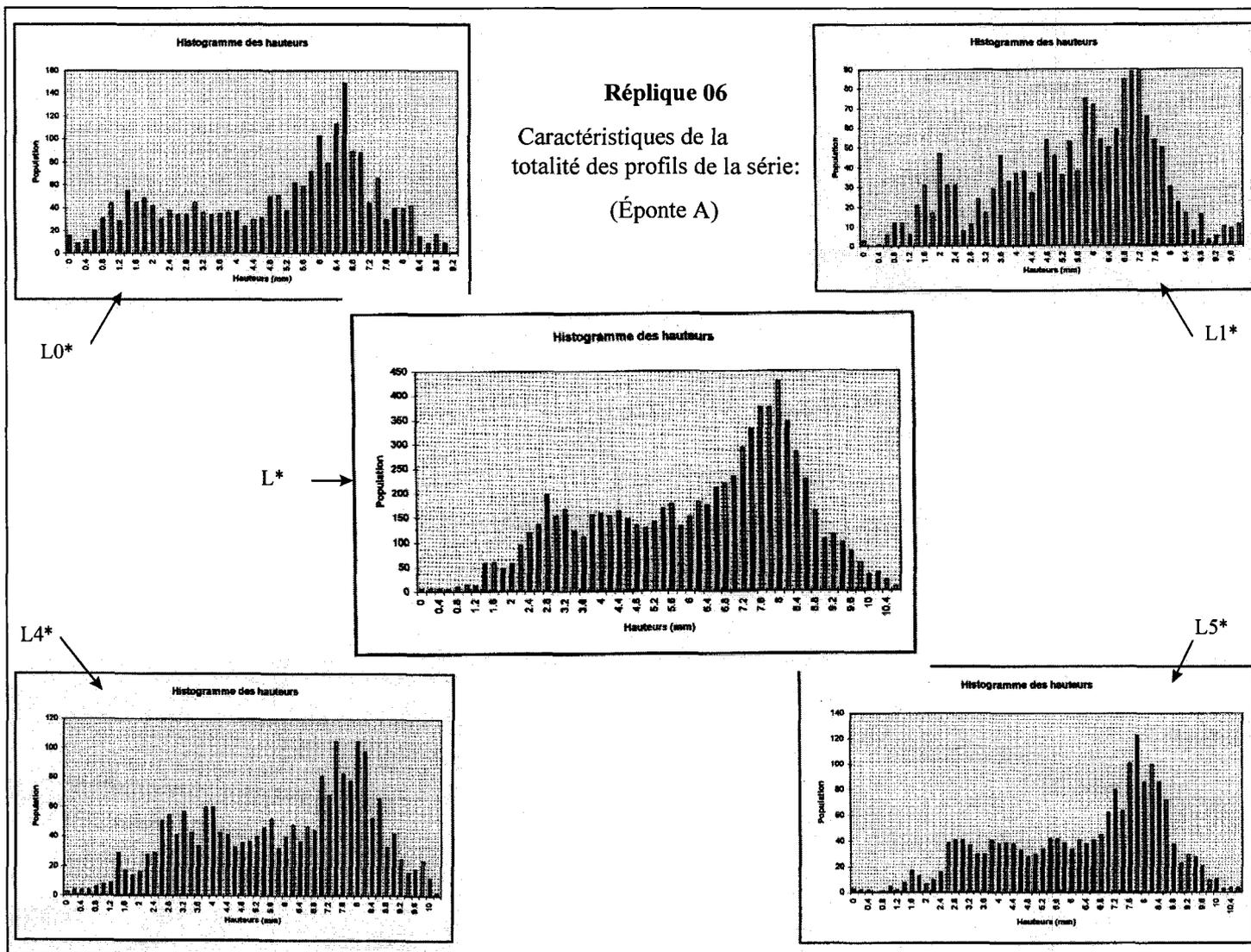


Figure 4.6: Histogrammes des distributions des hauteurs de la réplique 06

4.6 Reproductibilité des répliques

Le tableau 4.1 et 4.2 montre, pour chaque profil, les valeurs moyennes et écart-types de R_L , Z_2 , Z_4 , a_3 , et a_4 obtenus à partir des 20 répliques fabriquées pour le programme d'essais. Les très petits écart-types existants démontrent hors de tout doute que la technique de fabrication des surfaces des répliques est excellente et reproductible.

4.7 Modélisation des épontes avant cisaillement à l'aide du krigeage

L'outil de base de la géostatistique est le variogramme qui représente les variations du demi écart quadratique moyen de la variable régionalisée échantillonnée, Z , entre deux points distants d'une longueur h (figure 4.7).

Le variogramme est défini de la façon suivante:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[z(x) - z(x+h)] \quad (4.8)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[z(x) - z(x+h)]^2 \quad (4.9)$$

Lorsque le phénomène étudié se développe dans un espace à une dimension, ou que le phénomène est bidimensionnel, mais a été échantillonné le long d'un profil (ce qui est le cas dans cette étude), l'intervalle h considéré est un scalaire.

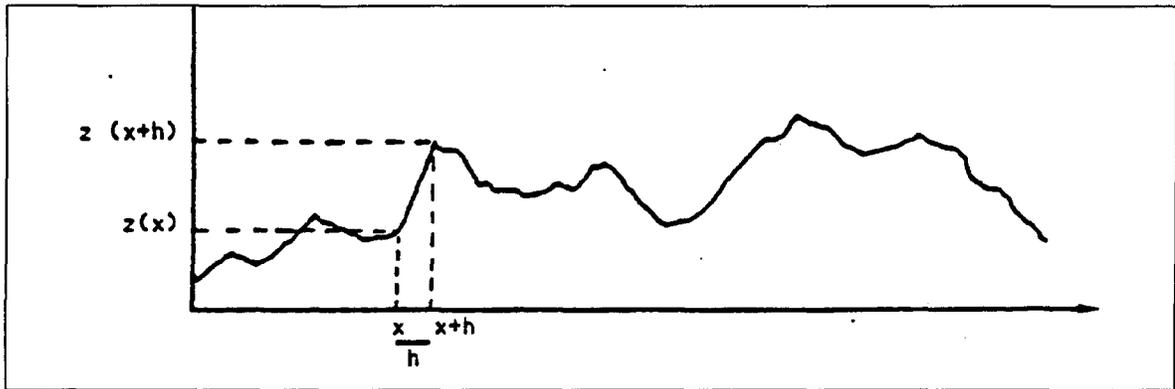


Figure 4.7: Définition des variables introduites dans le calcul du variogramme (tiré de Gentier, 1986).

Si les points échantillonnés sont alignés et régulièrement espacés, le variogramme peut être calculé pour des valeurs de h multiples du pas, à l'aide de la formule:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i + h) - z(x_i))^2 \quad (4.10)$$

où $z(x_i)$ sont les données expérimentales (hauteurs le long du profil aux points x_i et x_{i+h});

x_i sont les points pour lesquels les données sont disponibles à la fois en x_i et en x_{i+h} ;

$N(h)$, le nombre de couples de points distants de h .

Le variogramme caractérise la variabilité du phénomène étudié. Il peut posséder les caractéristiques suivantes:

- La portée: le variogramme est en général une fonction croissante de la distance. Mais dans un milieu stationnaire, le taux d'accroissement décroît jusqu'à ce qu'un palier soit

atteint à une certaine distance. Cette distance est appelée la portée du phénomène. La portée caractérise la zone d'influence d'une donnée, c'est-à-dire la distance au delà de laquelle il n'existe plus de corrélation spatiale. La valeur de γ pour une distance égale à la portée correspond donc à la variance globale des données.

- Structures emboîtées: on peut dans certain cas noter des variations brutales de la pente de $\gamma(h)$. Un tel variogramme montre l'existence de structures emboîtées. Ces structures sont dues à des variabilités de causes diverses à différentes échelles.

4.7.1 Le variogramme généralisé

La formulation géostatistique précédente a été développée dans le cadre de modèles à moyenne contante, ou du moins à accroissement d'espérance nulle:

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (4.11)$$

Il arrive fréquemment qu'un phénomène réel présente une tendance générale linéaire, ou parabolique. On dit que les phénomènes présentent une dérive qui se traduit par une moyenne qui est fonction du point:

$$E[Z(x)] = m(x) \quad (4.12)$$

On peut écrire, à condition que le variogramme soit défini comme la variance des accroissements, et non comme les espérances quadratiques (au facteur $\frac{1}{2}$ près):

$$2\gamma(h) = Var[Z(x+h) - Z(x)] \quad (4.13)$$

Pour filtrer une tendance générale linéaire ou parabolique du phénomène, Chilès (1979) a défini le variogramme généralisé $T(h)$ comme la variance de l'accroissement d'ordre k , à un facteur de normalisation près:

$$\Gamma_k(h) = \frac{1}{M_k} Var \left[\sum_{q=0}^{k+1} (-1)^q C_{k+1}^q Z(x + (k+1-q)h) \right] \quad (4.14)$$

Il est à noter que les équations démontrant cette équation se retrouvent dans Chilès (1979).

4.7.2 Ajustement du variogramme expérimental à un modèle théorique

La connaissance du variogramme expérimental permet d'apporter une solution optimale aux problèmes d'estimation linéaire. Mais, c'est le variogramme en tant que modèle mathématique qui intervient et non le variogramme expérimental. On cherche donc à ajuster un modèle théorique au variogramme expérimental. Les modèles de variogramme les plus fréquemment utilisés sont les modèles en h et les modèles sphérique, exponentiel et

gaussien (figure 4.8). Toute combinaison linéaire de ces différents modèles est possible (figure 4.9) pourvu que les coefficients soient positifs.

4.7.3 Krigeage

Pour faire une estimation, il faut tout d'abord spécifier un estimateur. Si $Z_r(x_1), \dots, Z_r(x_n)$ sont les valeurs réelles de la variable Z aux points x_1, \dots, x_n , un estimateur $Z^*(x)$ de $Z_r(x)$, où x est un point arbitraire, peut être défini par la fonction f :

$$Z^*(x) = f[Z_r(x_1), \dots, Z_r(x_n)] \quad (4.15)$$

La valeur estimée de Z au point x est une fonction des valeurs réelles $Z_r(x_1), \dots, Z_r(x_n)$.

La variance d'estimation σ_e^2 est définie par:

$$\sigma_e^2 = E[(Z_r - Z^*)^2] \quad (4.16)$$

Elle représente la différence entre valeurs estimées et valeurs réelles. L'estimateur est non biaisé si $E(Z^* - Z_r) = 0$.

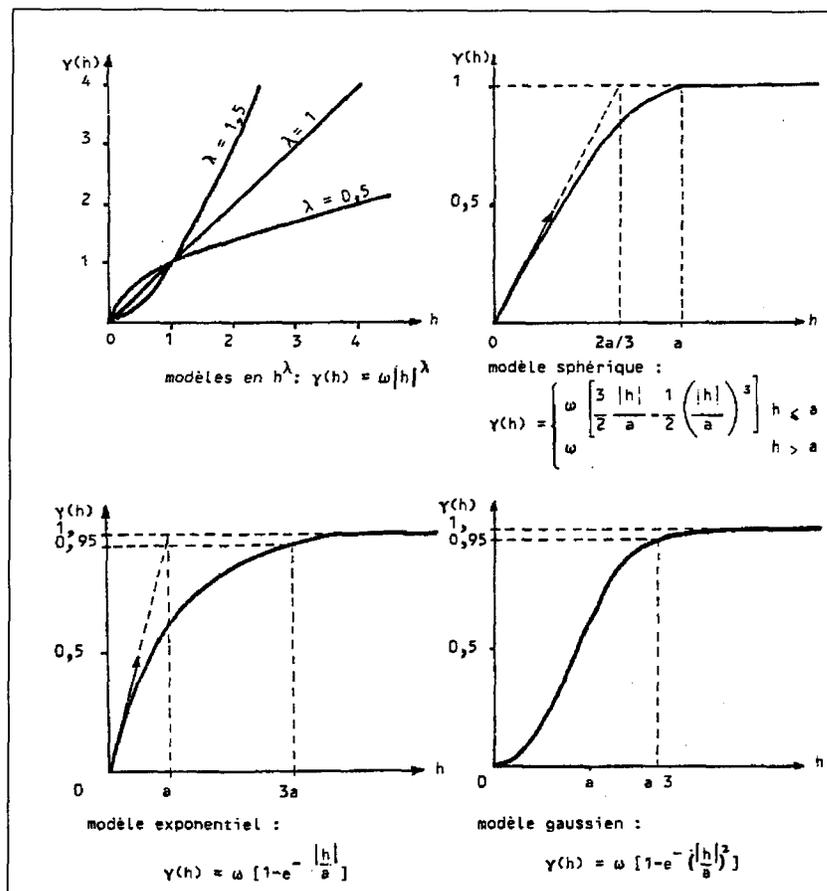


Figure 4.8: Principaux modèles de variogramme utilisés (tirée de Delhomme, 1978).

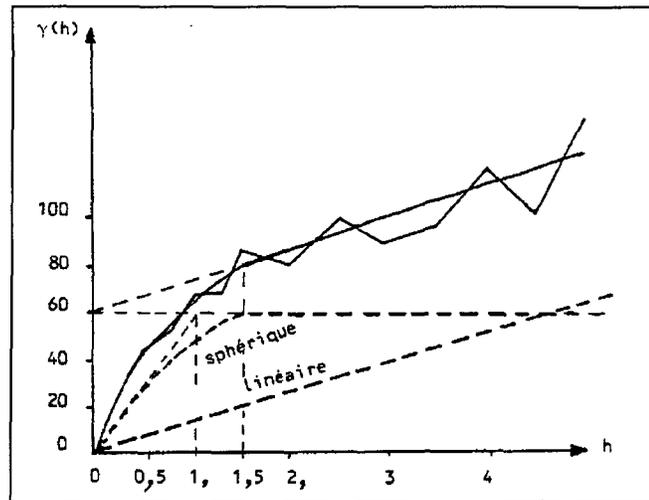


Figure 4.9: Exemple d'ajustement à un modèle linéaire+sphérique (tirée de Delhomme, 1978).

Le choix de la fonction f détermine le type d'estimateur. Le krigeage se limite à des fonctions f linéaires:

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{ri} \quad (4.17)$$

où les Z_{ri} sont les valeurs connues de la variable: $Z_{ri} = Z_r(x_i)$. Dans le cas de phénomènes stationnaires, mais dont la moyenne n'est pas connue avec certitude, on postule en imposant aux pondérateurs λ_i la condition:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (4.18)$$

Parmi l'ensemble des estimateurs linéaires non biaisés, l'estimateur de krigeage est celui qui produit la plus petite variance d'estimation. Cette condition d'optimalité, formulée en moyenne quadratique, permet, avec la condition de non-biais, de déterminer une combinaison unique des coefficients λ_i optimaux.

L'estimateur de krigeage a l'inconvénient de lisser les variations des données dans l'espace. Si plutôt qu'une estimation, on veut obtenir une image de la réalité qui mime ces variations dans l'espace, on fait appel aux techniques de simulation conditionnelle.

4.7.4 Reconstruction des épontes à l'aide du krigeage

La reconstruction des surfaces de la fracture est faite à l'aide du logiciel Surfer. Les étapes à suivre pour parvenir à la reconstruction des épontes sont les suivantes:

- 1) On enregistre dans un fichier les données (x, y, z) de tous les profils d'une éponte prélevés au rugosimètre.
- 2) On modélise par un variogramme théorique, le variogramme expérimental existant.
- 3) À l'aide de la technique du krigeage on fait des approximations des hauteurs entre les profils afin d'obtenir la reconstruction de l'éponte.

1) Préparation du fichier contenant les données du rugosimètre

La première opération à effectuer est de convertir les coordonnées (x, y) , correspondant aux axes d'une direction donnée, en des coordonnées (X, Y) qui correspondent aux axes de la direction 1 (0°). Il est à noter qu'on n'utilise que le tiers des données, car cela uniformise la densité de valeurs sur la surface de la fracture.

2) Modélisation du variogramme expérimental

A partir des variogrammes expérimentaux déterminés précédemment, une modélisation a été tentée afin de leur coller un modèle théorique. La modélisation fût concentrée sur les huit premiers millimètres, car c'est surtout dans ce domaine de déplacement tangentiel que le logiciel utilisé exécute les interpolations. La modélisation théorique a été faite en combinant les variances et portées de trois types de variogrammes théoriques (Gaussien, Exponentiel, Quadratique) en essayant de minimiser la somme des carrés des différences entre le modèle théorique et le modèle expérimental. Nous avons modélisé les variogrammes des dérivées et des hauteurs d'ordre 0 dans la direction 1 (0°).

3) Krigeage

Disposant du fichier contenant toutes les données des profils dans la direction 1 et le modèle théorique des variogrammes expérimentaux de la direction 1, on peut reconstruire, à l'aide de la fonction krigeage de SURFER, la surface de l'éponte.

Il est à noter que la modélisation est limitée à un diamètre des éponges de 116 mm, car les 2 mm en périphérie sont supprimés afin d'éviter l'interpolation moins fiable en bordure.

Les figures 4.10 et 4.11 présentent pour les éponges A et B de la réplique 10 le résultat de la modélisation du variogramme moyen des dérivées et des hauteurs avant cisaillement.

Finalement, les figures 4.12 à 4.13 montrent les reconstructions des éponges A et B de la réplique 10 (avant cisaillement). Il est à noter sur ces figures que la reconstruction de l'éponge 10 montre une exagération verticale.

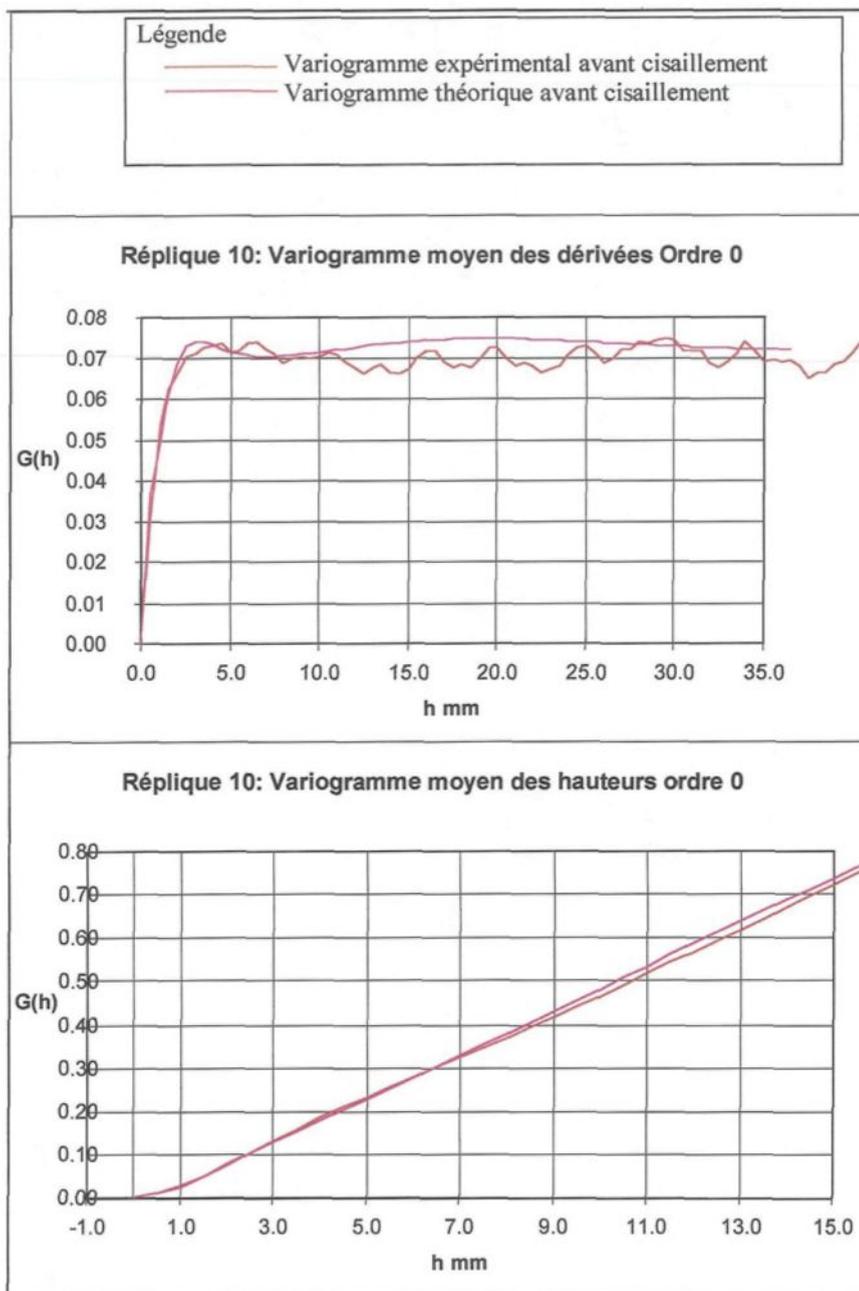


Figure 4.10: Résultat de la modélisation sur les variogrammes moyens des dérivées et des hauteurs de l'éponte A dans la direction 1.

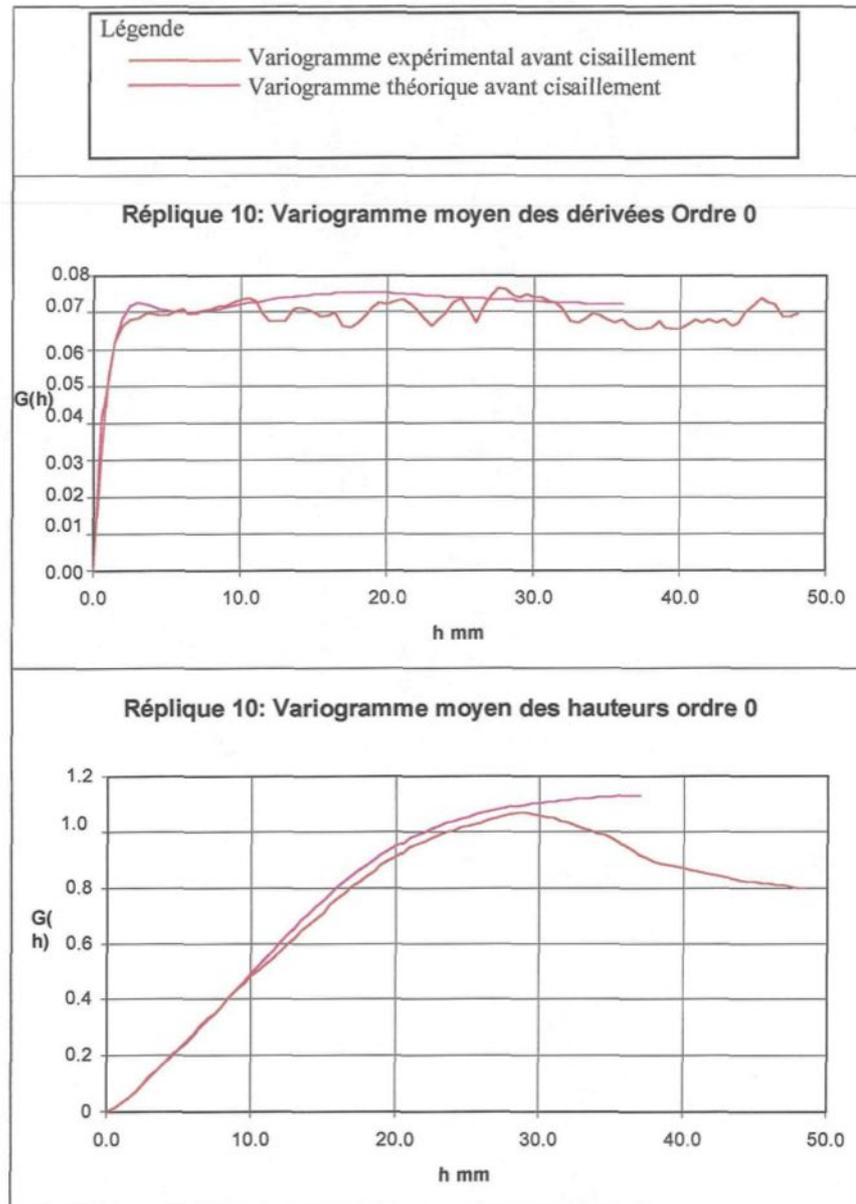


Figure 4.11: Résultat de la modélisation sur les variogrammes moyens des dérivées et des hauteurs de l'éponte B dans la direction 1.

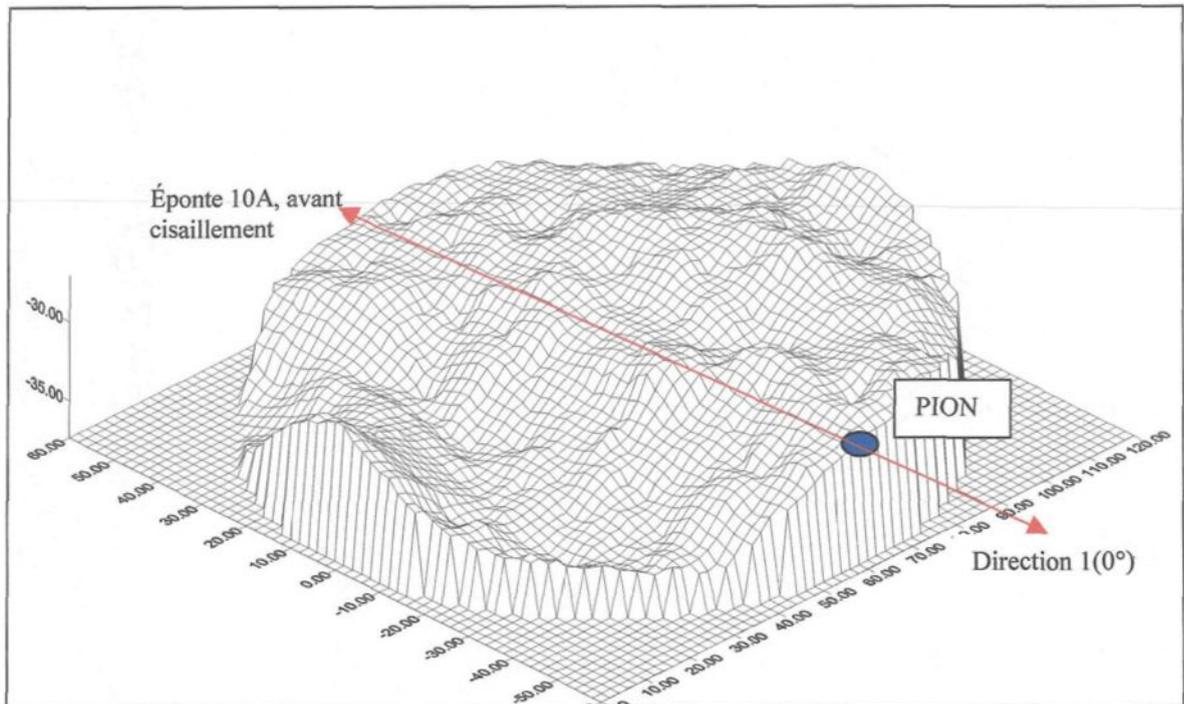


Figure 4.12: Reconstruction de l'éponte A de la réplique 10 avant cisaillement.

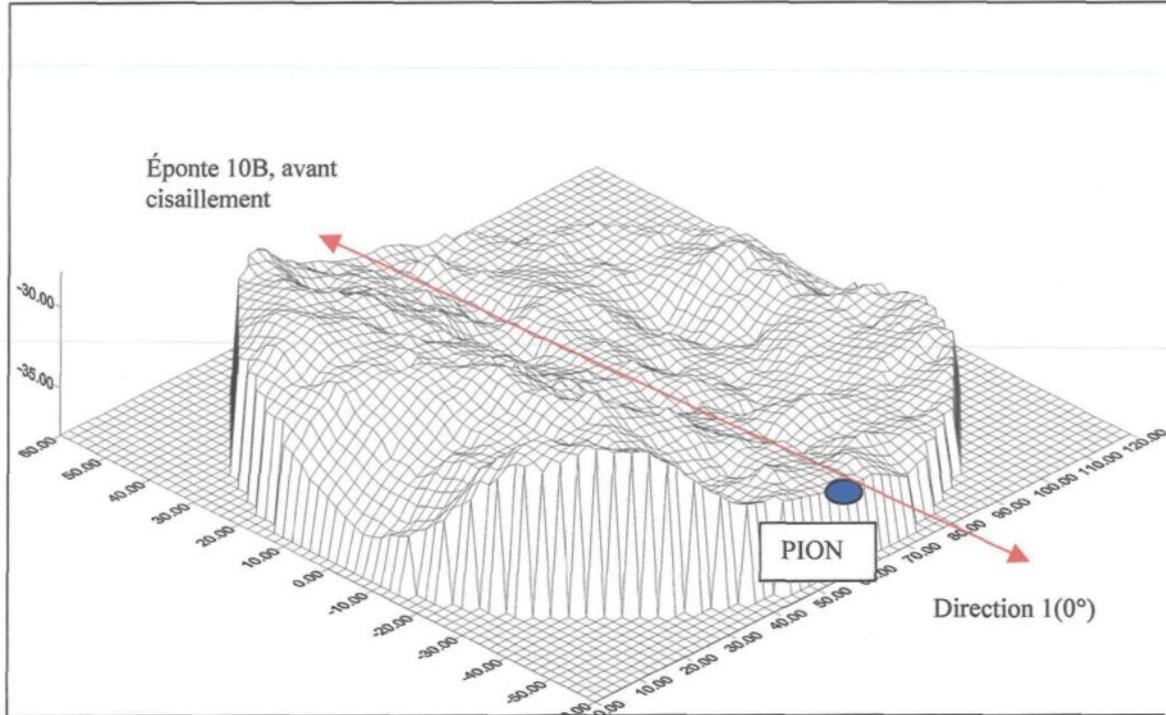


Figure 4.13: Reconstruction de l'éponte B de la réplique 10 avant cisaillement.

4.7.5 Discussion

Bien que le krigeage ne permette pas de recréer tous les petits détails de la surface, la densité de profils de rugosité permet néanmoins à la surface krigée de montrer, et d'amplifier (dû à l'exagération verticale), les caractéristiques morphologiques importantes de la surface déterminante pour le comportement hydromécanique de la fracture en cisaillement.

Ainsi, la figure 4.12 fait apparaître une structure morphologique de grandes dimensions qui se superpose aux aspérités plus petites de différentes dimensions. Cette structure de grandes dimensions engendre un palier plus élevé occupant un peu plus de la moitié de la surface de la fracture. Ce palier plus élevé est lié à la partie plus basse par une zone de forte pente orientée presque parallèlement à la direction 1 (0°). L'histogramme des hauteurs montre deux pics à 3 et 8 mm représentant la hauteur moyenne des paliers haut et bas. À l'extrémité de la portion basse, on remarque une aspérité de grande dimension s'apparentant probablement à celle décrite précédemment. Mise à part cette aspérité se situant en bordure, l'étude de Flamand (2000) montre les mêmes résultats.

Chaque vallée et aspérité de l'éponte A correspond à une aspérité ou à une vallée de l'éponte B. Les considérations discutées aux deux paragraphes précédents sont donc également valables pour l'éponte B.

CHAPITRE 5
PROGRAMME D'ESSAIS

CHAPITRE 5

PROGRAMME D'ESSAIS

5.1 Introduction

Pour atteindre les objectifs fixés, un programme expérimental d'essais de cisaillement-perméabilité sur des répliques contenant un joint sous contrainte normale constante a été effectué. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une machine de cisaillement direct (chapitre 2) sur des répliques cylindriques (annexe 2) contenant une fracture, fabriqués à partir d'un matériau analogue, facilitant l'interprétation des essais hydrauliques basés sur un écoulement radial divergent. Un système de captage (annexe 3) et de récupération compartimentée permet d'évaluer le comportement directionnel de l'écoulement en fonction de la direction de cisaillement sur la fracture, du niveau de contrainte normale appliquée et des différentes phases de comportement mécanique de la fracture soumise au cisaillement (mobilisation du frottement, mobilisation de la dilatance, pic de cisaillement, ramollissement post-pic par dégradation des aspérités et phase résiduelle).

5.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental établi pour les essais hydromécaniques sur un joint en cisaillement se définit comme suit:

1. Installation de la réplique dans la machine de cisaillement et saturation complète de tout le système.
2. Mise en place de l'échantillon par cycle de chargement et déchargement;
3. Application de la contrainte normale désirée pour l'essai;
4. Lancement d'un cycle d'injection comprenant quelques débits constants (Q_i). Pour chaque débit, après l'établissement d'un régime permanent (P_i), prise des mesures de pressions et des poids récupérés dans les bacs de récupérations.
5. Application du premier pas de cisaillement (ΔU_1);
6. Recommencer les étapes 4 et 5 autant de fois qu'il y a de cycles d'injection (Q_i), (P_i) et de pas de cisaillement (ΔU_i).
7. La fin de l'essai est occasionné par une fuite importante ou un cisaillement de 5 mm.

5.3 Identification des secteurs et directions de cisaillement

Comme mentionné auparavant, le programme d'essai fait appel à un système de récupération compartimentée et à des directions de cisaillement sur la fracture. Les figures 5.1 (a,b) définies, pour le programme d'essai, la numérotation des capteurs de masse correspondant aux secteurs de récupération et les directions de cisaillement 0° et 90° . On voit que le système de récupération est inféodé (ou solidaire) à la machine de cisaillement. Par contre, pour les directions de cisaillement, la réplique avec son repère (pion) tourne à l'intérieur de la machine de cisaillement et s'aligne avec le secteur 5 pour la direction 0° , le

secteur 7 pour la direction 90° , le secteur 1 pour la direction 180° et le secteur 3 pour la direction 270° .

5.4 Phases d'études

Le programme expérimental, mentionné au chapitre précédent, se divise en deux phases. La première phase (1995) a consisté à concevoir, vérifier et tester tous les nouveaux dispositifs expérimentaux et à intégrer l'ensemble dans la définition d'un protocole d'essais. La deuxième phase (1996) a permis, après quelques modifications suscitées par la première phase, d'effectuer le programme d'essais.

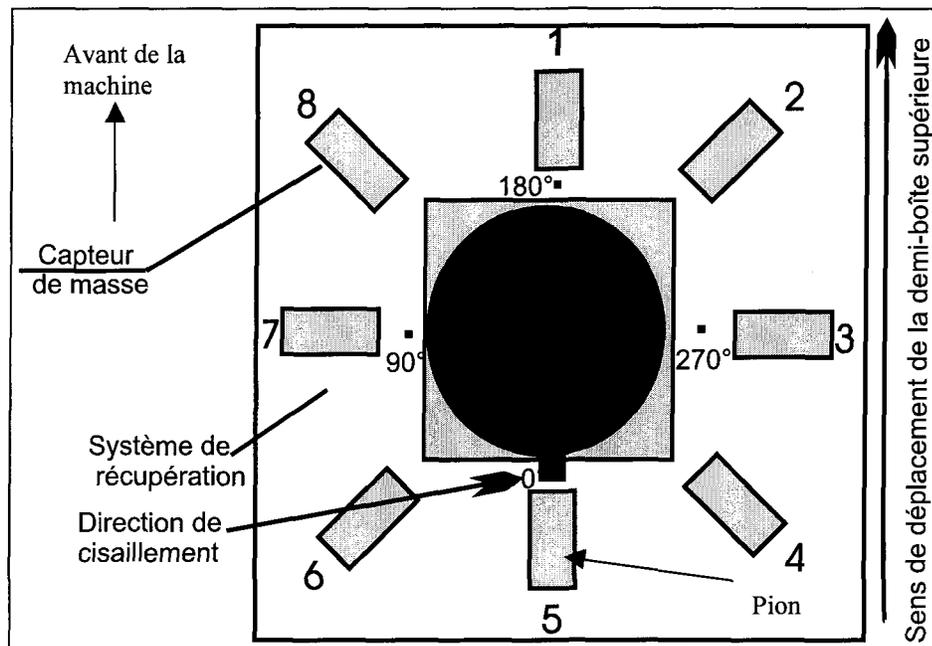


Figure 5.1a: Vue de dessus de la position des capteurs de poids autour des échantillons pour les essais dans la direction 0° (système de récupération inféodé à la machine de cisaillement).

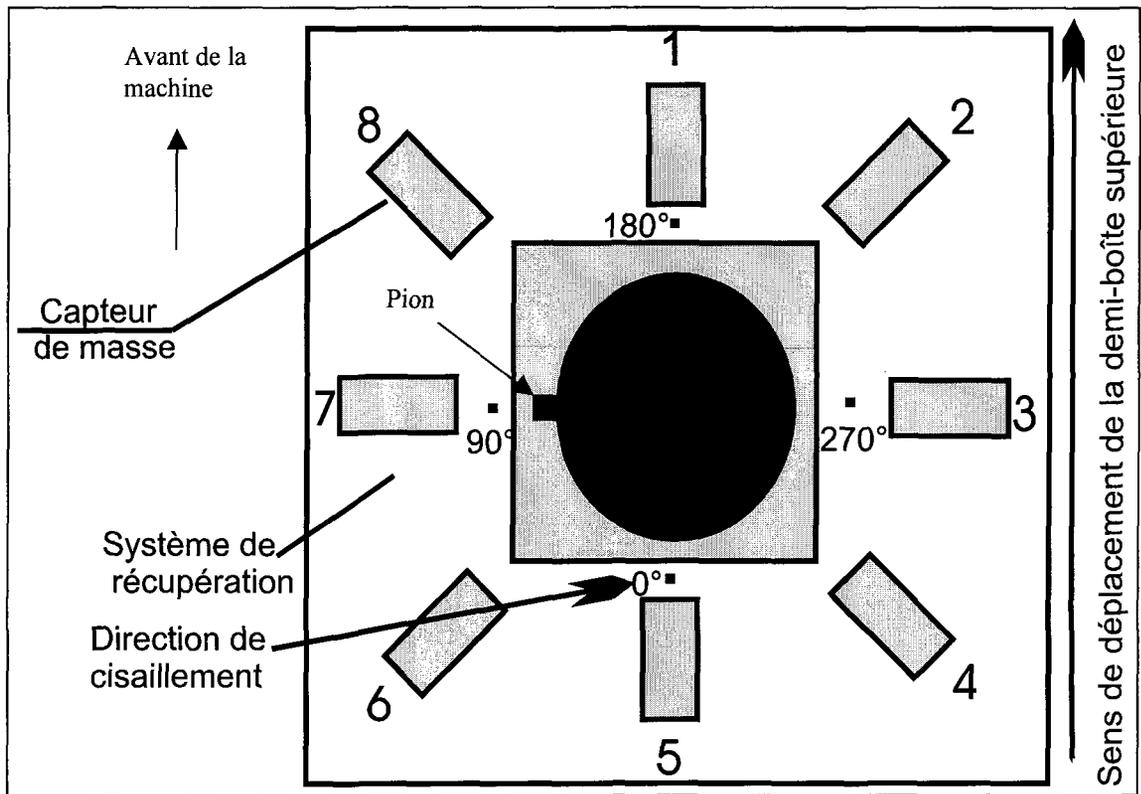


Figure 5.1b: Vue du dessus de la position des capteurs de poids autour des échantillons pour les essais dans la direction 90° (système de récupération inféodé à la machine de cisaillement).

5.4.1 Première phase (1995)

Cinq essais furent effectués dans cette première phase dans les quatre directions de cisaillement (0° , 90° , 180° et 270°) et n'utilisant que les niveaux de contrainte de 5 et 7 MPa (tableau 5.1). Les essais se sont déroulés à une vitesse constante de 0.5 mm/min. Les pas de cisaillement et les débits testés sont résumés au tableau 5.1. Les débits sont choisis lors des essais afin de maintenir une pression d'injection significative lorsque que la fracture se dilate.

Tableau 5.1 : Caractéristiques des essais de la première phase.

Contrainte normale (MPa)	Direction de cisaillement	N° essai et/ou réplique	Date de fabrication	N° capteur de poids associé à la direction de cisaillement	Nombre de pas de cisaillement	Nombre débits testés
5	0°	1	07/07/1995	5	4 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm)	2 (500, 1640 cm ³ /h)
7	90°	2	08/07/1995	7	6 (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm)	4 (200, 350, 500, 1640 cm ³ /h)
7	90°	3	10/07/1995	7	13 (0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 mm)	3 (200, 500, 1640 cm ³ /h)
7	180°	4	22/07/1995	1	13 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0 mm)	3 (200, 500, 1640 cm ³ /h)
7	270°	5	23/07/1995	3	13 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 mm)	3 (200, 500, 1640 cm ³ /h)

5.4.2 Deuxième phase (1996)

Le programme expérimental planifié lors de la deuxième phase (1996, phase d'essais) porte sur l'étude du comportement hydraulique d'une fracture soumise à des essais de cisaillement direct dans quatre directions particulières (0°, 90°, 180° et 270°) et pour quatre niveaux de contraintes normales différentes: 3, 5, 7 et 9 MPa. La valeur de 9 MPa pour la contrainte normale ne peut être dépassée à cause des limites de la machine de cisaillement. Les essais se sont aussi déroulés à une vitesse constante de 0.5 mm/min. Les cycles d'injection ont été effectués entre les phases des déplacements suivants: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5,

0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 et 5.0 mm. Ces cycles d'injections se sont faits à plusieurs valeurs de débit constant. Le tableau 5.2 résume les caractéristiques de ces essais.

Tableau 5.2 : Caractéristiques des essais de la deuxième phase

Contrainte normale (MPa)	Direction de cisaillement	N° essai et/ou réplique	Date de fabrication	N° capteur de poids associé à la direction de cisaillement	Nombre de pas de cisaillement	Nombre débits testés
3	0°	13	11/07/96	5	8 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
3	90°	12	10/07/96	7	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
3	180°	11	9/07/96	1	8 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
3	270°	15	16/7/96	3	10 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
5	0°	*1	12/06/96	5	3 (0.1, 0.2, 0.3 mm)	2 (250, 1000, cm ³ /h)
5	0°	**3	17/06/96	5	3 (0.15 mm)	2 (250, 1000, cm ³ /h)
5	0°	6	1/07/96	5	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, mm)	6 (200, 500, 1000, 4000, 6000, 8000 cm ³ /h)
5	90°	8	3/07/96	7	8 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0 mm)	5 (200, 1000, 4000, 8000, 9500 cm ³ /h)

Contrainte normale (MPa)	Direction de cisaillement	N° essai réplique	Date de fabrication	N° capteur de pesée associé à la direction de cisaillement	Nombre de pas de cisaillement	Nombre débits testés
5	180°	7	2/07/96	1	10 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
5	270°	10	8/07/96	3	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
7	0°	5	27/06/96	5	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm)	5 (200, 1000, 2000, 4000, 8000 cm ³ /h)
7	90°	2	13/06/96	7	8 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
7	180°	9	4/07/96	1	8 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
7	270°	4	20/06/96	3	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
9	0°	18	22/07/96	5	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
9	90°	20	24/07/96	7	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
9	180°	19	23/07/96	1	8 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0 mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
9	270°	17	18307/96	3	9 (0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, mm)	4 (200, 1000, 4000, 8000 cm ³ /h)
		***14	15/07/96			
		***16	16/07/96			

(*) (**) Répliques utilisées pour les essais de moulage des vides

(***) Répliques non utilisées lors des essais

5.5 Données recueillies

Les données recueillies et exploitables lors d'un essai sont de trois types: physique, mécanique et hydraulique.

- Les données physiques sont la température (T) et la nature du fluide.
- Les données mécaniques sont la contrainte de cisaillement (τ), la contrainte normale (σ_n), les angles de deux inclinomètres ("*blue pots*") perpendiculaires permettant de vérifier les basculements de la boîte de cisaillement, le déplacement normal (v) et le déplacement tangentiel (u). Les déplacements horizontaux (u) et verticaux (v) sont mesurés à l'aide de capteurs de déplacement de type L.V.D.T.. Les contraintes normales et de cisaillement sont calculées en fonction de la force appliquée à la surface de l'échantillon. Elles sont constamment recalculées et ajustées pour tenir compte de la diminution de la surface cisailée au cours d'un essai.
- Les données hydrauliques sont la pression d'injection (P), le débit d'injection (Q) et la masse dans les huit bacs de récupération.

5.6 Traitements des données.

5.6.1 Transmissivité intrinsèque

A partir des essais effectués, on peut estimer la transmissivité intrinsèque de la fracture qui est une caractéristique indépendante du fluide percolant.

En considérant un écoulement laminaire radial divergent entre deux surfaces cylindriques concentriques de rayon extérieur r_e et de rayon intérieur r_i , la pression

intérieure ayant pour valeur H_o , la pression extérieure étant approximativement nulle, on peut estimer que la charge H_r varie comme $\ln r$ (figure 5.2).

$$H(r) = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_e}\right)}{\ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right)} H_o \quad (5.1)$$

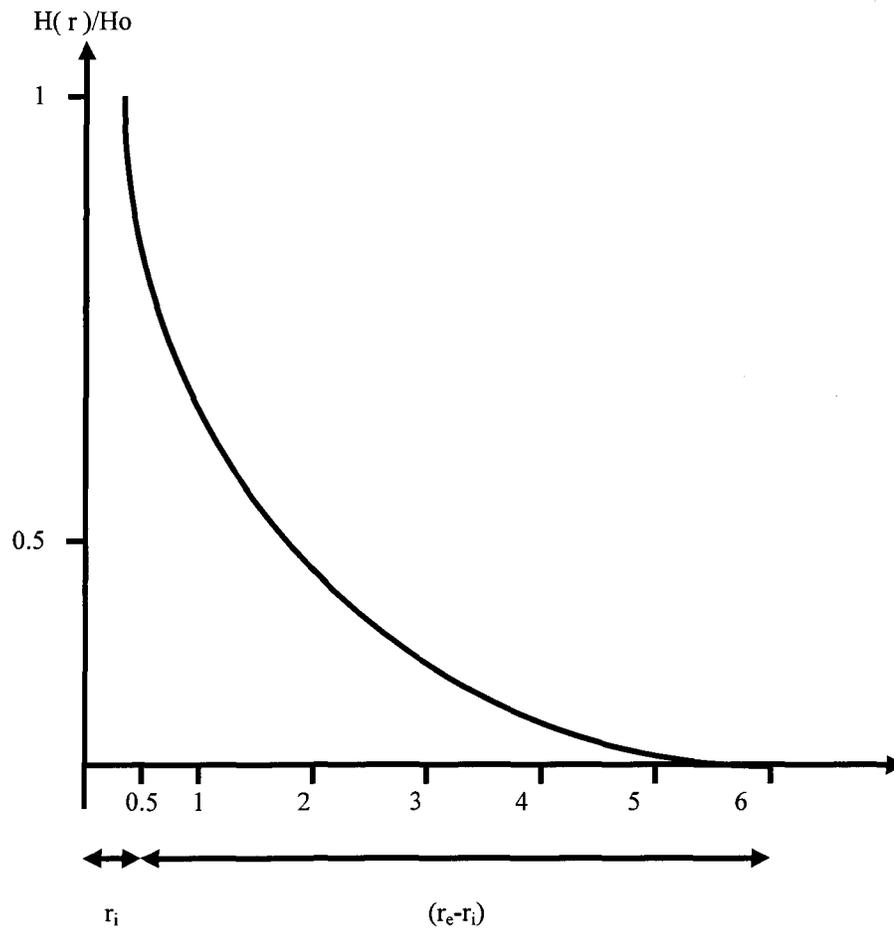


Figure 5.2: Variation de la charge H_r le long du rayon r de l'éprouvette (Tiré de Gentier 1987).

La vitesse de filtration est proportionnelle au gradient de H.

$$V = -K \frac{dH}{dr} = -K \frac{H_o}{\ln \frac{r_i}{r_e}} \frac{1}{r} \quad (5.2)$$

Où K est le coefficient de perméabilité de la fracture, ou encore appelé conductivité. Sa dimension est homogène à une vitesse (LT^{-1}) (V est en cm/s si H_o est la pression intérieure exprimée en centimètres d'eau).

On définit une perméabilité intrinsèque de la fracture, qui ne prend en compte que les caractéristiques géométriques (indépendante du fluide percolant) par la relation suivante:

$$k_f = \frac{\mu}{\rho g} K \quad (5.3)$$

Cette perméabilité intrinsèque de la fracture est homogène à une surface (L^2). Elle est habituellement exprimée en cm^2 avec ρ (masse volumique de l'eau) en g/cm^3 , g (accélération de la pesanteur) en cm/s^2 et μ (viscosité dynamique du fluide) en poises.

Le débit volumique Q du fluide recueilli est le flux de la vitesse de filtration à travers un cylindre quelconque. En considérant une ouverture hydraulique équivalente de la fracture, e indépendante de r , on peut écrire:

$$Q = V 2\pi r e \quad (5.4)$$

$$Q = -Ke \frac{2\pi}{\ln \frac{r_i}{r_e}} H_o$$

Le produit Ke est appelé transmissivité de la fracture. Elle représente l'intégration de la perméabilité sur l'épaisseur e .

$$Ke = -\frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_e} \frac{Q}{H_o} \quad [L^2 T^{-1}] \quad (5.5)$$

On peut en déduire la transmissivité intrinsèque $k_f e$:

$$k_f e = -\frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_e} \frac{Q}{H_o} \frac{\mu}{\rho_o g} \quad (5.6)$$

ou encore

$$k_f e = -\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_e} \frac{Q}{\Delta P} \quad [L^3] \quad (5.7)$$

La transmissivité intrinsèque est exprimée en cm^3 si Q est en cm^3/s , P en dixièmes de Pascal et μ en Poise.

Finalement à partir du calcul de la transmissivité intrinsèque, on peut calculer une ouverture hydraulique équivalente. Ce calcul repose sur l'hypothèse d'une fracture lisse et plane (loi cubique) et ne tient donc pas compte de la rugosité des épontes.

$$\begin{aligned} e &= \sqrt[3]{12k_f e} \\ k_f e &= \frac{e^3}{12} \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.6.2 Calcul de la transmissivité intrinsèque

A partir des mesures effectuées lors des essais on peut calculer directement la transmissivité intrinsèque de la fracture pour toutes les injections aux différents débits, aux différentes contraintes normales, aux différents pas de cisaillement et aux différentes directions de cisaillement.

$$k_f e = -\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_i}{r_e} \frac{Q}{\Delta P} \quad (5.9)$$

$$\mu = 10^{-2} \text{ poise pour l'eau à } 20 \text{ }^\circ\text{C} = 1 \times 10^{-3} \text{ N s/m}^2$$

$$r_i = 0,5 \text{ cm}$$

$$r_e = 6 \text{ cm}$$

$$k_{fe} = 1.0986 \times 10^{-6} \frac{Q}{\Delta P}$$

Avec P en mbar et Q en l/h et la transmissivité intrinsèque (k_{fe}) en cm^3 .

Comme la viscosité dynamique μ varie avec la température, les variations de température ont été enregistrées d'un essai à l'autre. Les variations observées sont du même ordre de grandeur que celles observées dans la thèse de Gentier (1986). Ceci entraîne donc, au niveau du calcul de la transmissivité intrinsèque, une variation de l'ordre de 5% en prenant les valeurs des constantes à 20°C.

5.6.3 Corrections des mesures de pression

Avant de calculer la transmissivité intrinsèque de la fracture, il faut effectuer des corrections sur les mesures de pressions. Le dispositif d'injection et de récupération est schématisé ci dessous (figure 5.3).

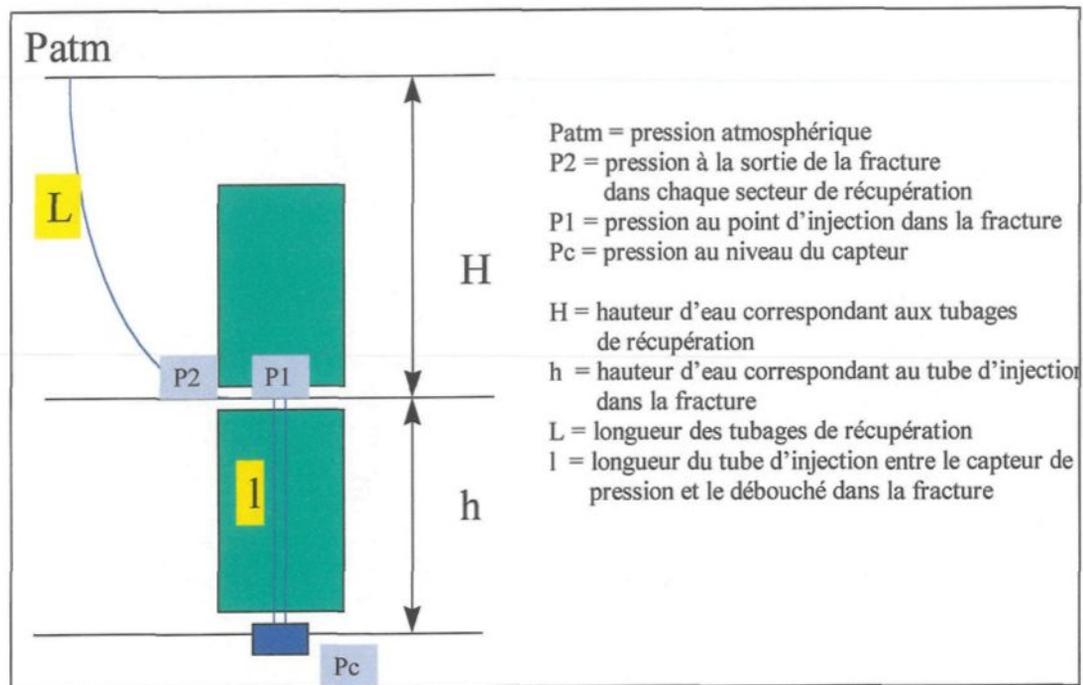


Figure 5.3 : Schéma d'injection et récupération

Dans le calcul de la transmissivité intrinsèque de la fracture, c'est la différence de pression entre le point d'injection (P_1) et les points de sortie (P_{2i}) qui intervient pour un débit donné.

La pression en chacun des points s'écrit d'une manière générale sous la forme:

$$P_1 = P_c - \rho gh - P_{ch1} \quad (5.10)$$

où P_{ch1} est la perte de charge associée au tubages d'injection.

$$P_{2i} = P_{atm} + \rho g H + P_{ch2i} \quad (5.11)$$

où P_{ch2i} est la perte de charge associée aux tubages de récupération à la sortie de chaque secteur i .

Et la différence de pression s'écrit:

$$\rho P_i = P_1 - P_{2i} = (P_c - P_{atm}) - \rho g (h + H) - (P_{ch1} + P_{ch2i}) \quad (5.12)$$

Les pertes de charge se situent d'une part au niveau du tubage d'injection dans la fracture (P_{ch1}) et d'autre part dans les tubages de récupération en sortie des secteurs (P_{ch2i}).

D'après les mesures effectuées (annexe 7), le coefficient de perte de charge (C_1) du tube d'injection dans la fracture obtenu à partir de la pente de la droite de régression est de 2.12×10^{-4} mbar/(ml/h). Ce coefficient de perte de charge est directement établi pour la longueur considérée lors des essais. La perte de charge P_{ch1} est donc pour un débit Q égal à:

$$P_{ch1} = C_1 * Q \quad (5.13)$$

D'après les mesures effectuées (annexe 7), le coefficient de perte de charge dans les tubages de récupération obtenu à partir de la pente de la droite de régression est de 3.26×10^{-3} mbar/(ml/h)/m. Le coefficient de perte de charge associé à chacun des tubages de récupération est donc:

$$C_{2i} = 1.96 \times 10^{-3} \text{ mbar/(ml/h)} \text{ (tous les tubages ont la même longueur; 0.6m)}$$

Il est à noter que ces mesures de pertes de charges ont été effectuées seulement pour les essais de la deuxième phase du projet (programme d'essai).

5.6.4 Estimation de la hauteur d'eau H

La hauteur d'eau H associée (hauteur d'eau entre le niveau de sortie de la fracture et le débouché des tubages de récupération) est estimée via une mesure de pression directe au moyen du capteur à 31.85 mbar à $31.85 \times 1.019 = 32.5$ cm.

5.6.5 Débit d'injection dans le calcul de la transmissivité intrinsèque.

Pour les calculs de transmissivité globale de la fracture, on a utilisé, pour les essais de la deuxième phase, la moyenne des débits obtenus par le calcul de la sommation des poids dans les bechers du système de récupération en fonction du temps. La figure 5.4 (A) montre, pour une consigne d'injection de 1 l/h, les différentes valeurs de débit calculées aux différents déplacements tangentiels. On voit que les débits calculés pour les différents déplacements tangentiels ne montrent aucune tendance. La figure 5.4 (B et C) montre, pour les consignes d'injection de 4 et 8 l/h les débits calculés pour l'ensemble des essais. Pour la

première phase, nous avons pris directement la lecture du débitmètre de la pompe roop. La pompe roop est une pompe volumétrique à haute pression ROP-DT 12421. Les limites de capacité sont de 1640 cm³/h, 1000 bars et une régulation possible à débit ou pression constante.

5.6.6 Comportement de la pression lors des injections.

Le comportement de la pression en fonction des injections dans la fracture peut se diviser en 3 étapes (figure 5.5):

- 1) une montée rapide jusqu'à un maximum;
- 2) une petite diminution qui peut s'expliquer par la stabilisation des vitesses dans la fracture
et
- 3) une pseudo-stabilisation (ascension très lente). La stabilisation de la pression, après le pic, devrait se faire suivant une valeur constante en régime permanent. Dans nos essais, cette stabilisation se fait plutôt suivant une pente ascendante modérée. Une étude plus en détail de ce problème a permis de dégager les comportements suivants:
 - Pour un même déplacement tangentiel et un même débit, la pente ascendante augmente avec l'augmentation de la contrainte normale.

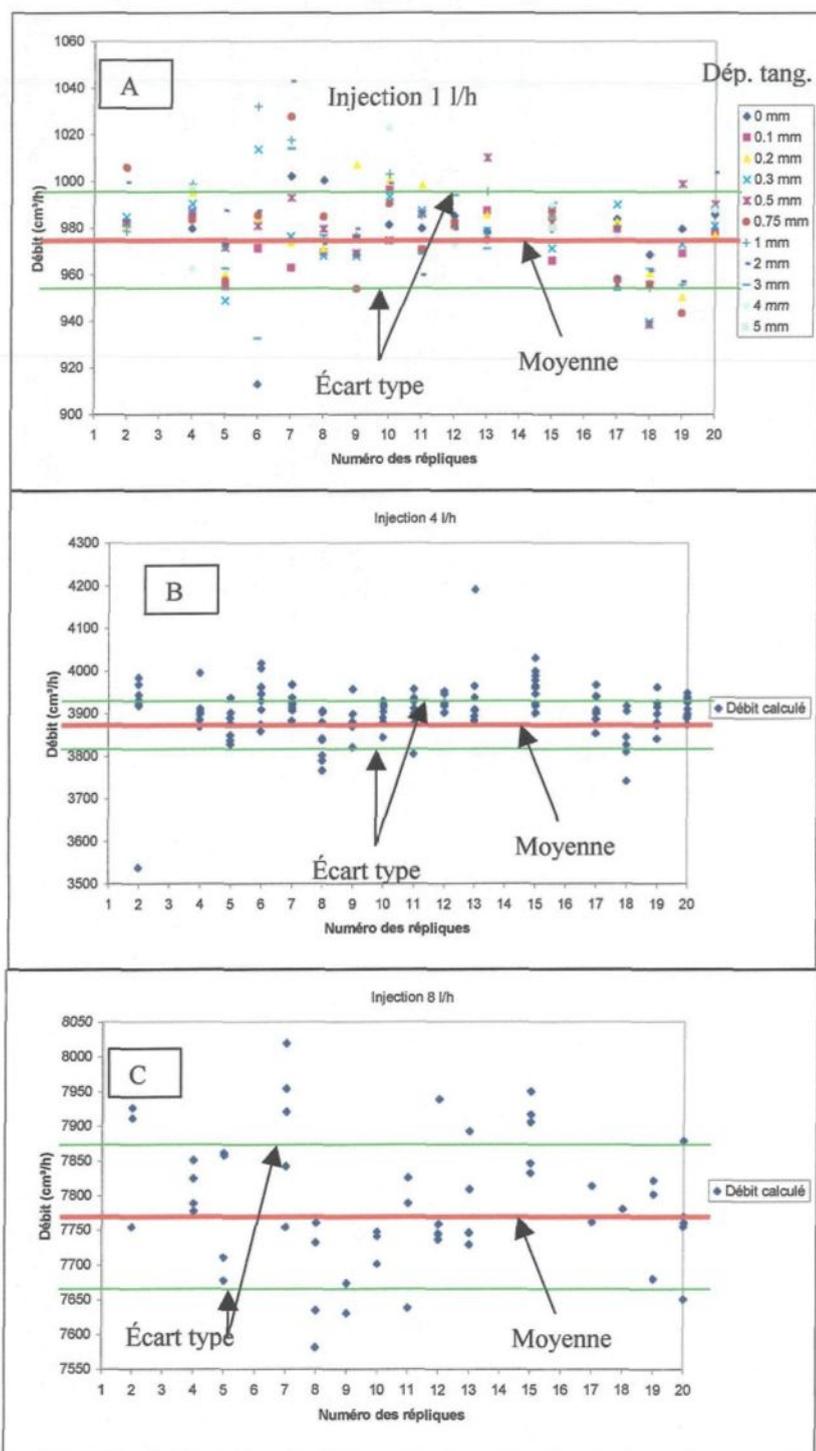


Figure 5.4: A) Débits calculés pour chacune des répliques aux différents déplacements tangentiels; B) et C) débits calculés pour chacune des répliques.

- Pour un même déplacement tangentiel et une même contrainte normale, la pente ascendante augmente avec l'augmentation du débit.
- Pour une même contrainte normale et un même débit, la pente ascendante diminue avec l'augmentation du déplacement tangentiel associé à la dilatance.

Les hypothèses retenues pour expliquer l'augmentation de la pression avec le temps (pente ascendante) pour l'injection d'un même débit sont:

- Phénomène hydraulique.
 - turbulence.
- Les phénomènes physico-chimiques.
 - Agent chimique en surface du mortier,
 - micro bulles,
 - mobilisation de fines particules en suspension.

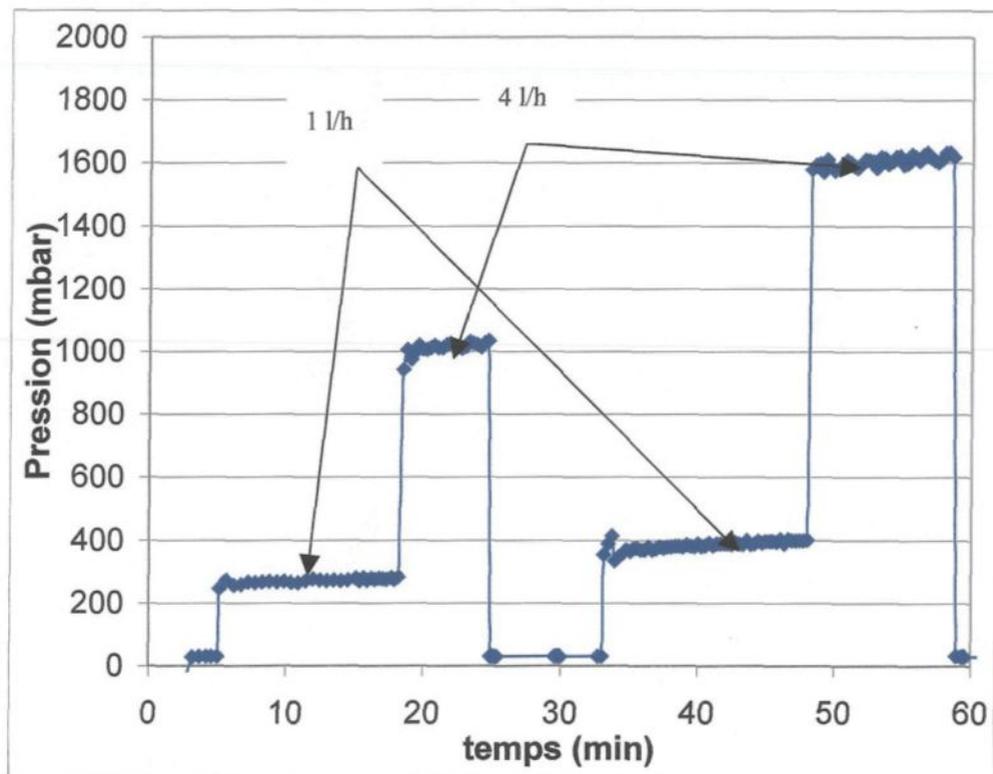


Figure 5.5: Exemple type de l'évolution de la pression lors d'injection à différents débits et différents déplacements tangentiels.

CHAPITRE 6
ANALYSE DES RÉSULTATS

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous mettrons l'accent sur l'analyse des seize essais de la deuxième phase réalisée aux quatre paliers de contraintes normales (3, 5, 7, 9 MPa) dans quatre directions de cisaillement (0° , 90° , 180° , 270°). L'analyse des essais préliminaires de la première phase a bien servi à identifier les modifications à apporter au montage quant à la hausse de la capacité d'évacuation des secteurs, à l'augmentation du débit d'injection, à l'ajout d'un capteur à faible pression et à la mise en place de l'échantillon (Gentier et al., 1997; annexe 12). Étant donné que les cinq essais de la première phase ont été repris dans le programme d'essais de la seconde phase, on peut évaluer la répétitivité de certains paramètres et vérifier les correctifs apportés sur la base des principaux points retenus dans l'analyse des essais préliminaire de la première phase (Gentier et al., 1997; annexe 12).

Il faut noter que l'opération de mise en place (modification apporté à la deuxième phase) décrite au chapitre 3 n'a pas été effectuée pour les quatre premiers essais au palier de contrainte 5 MPa. Un chargement de fatigue de quelques heures, à contrainte normale élevée (9 MPa), a plutôt été utilisé avant d'effectuer les essais. L'enregistrement d'une fermeture continue dans le temps de la fracture pendant l'essai de fatigue a été noté.

Devant l'impossibilité de prédire les variations d'un essai à l'autre (même point de départ après l'essai de fatigue), il a été décidé, pour les trois autres paliers de contrainte normale, d'utiliser la procédure de mise en place décrite au chapitre 3.

6.2 Comportement mécanique

Le comportement mécanique des échantillons est illustré à l'annexe 9 par les courbes contrainte tangentielle-déplacement tangentiels et les courbes déplacement normal-déplacement tangentiels correspondant aux 16 essais. Les différents paramètres déduits de ces courbes sont synthétisés dans le tableau 1 de l'annexe 9.

Tel que mentionné précédemment, les 4 essais au palier de contrainte 5 MPa n'ont pas subi la procédure de mise en place.

L'analyse des courbes de dilatance par direction de cisaillement (figure 6.1, 6.2 et annexe 9), permet d'observer que la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale. Par contre, les essais à 5 MPa, direction 0° , 90° et direction 270° ne respectent pas cet ordre logique. Les résistances en compression uniaxiale des éprouvettes témoins (annexe 1) représentant les épontes des essais à 0° et 270° (au palier de contrainte de 5 MPa) montrent des valeurs respectives de 65.6-89.5 MPa et 85.5-72.0 MPa. Ce différentiel important peut avoir engendré un comportement dilatant quelque peu différent par l'arasement de structures moins résistantes. Sur les figures 6.1 et 6.2, les courbes en rouges représentent les essais réalisés lors de la première phase de 1995. Ces courbes montrent

généralement des dilatances plus élevées que celles enregistrées lors de la deuxième phase. Ceci peut s'expliquer par la différence entre les résistances en compression uniaxiale des deux phases; 87 MPa pour la première phase et 74 MPa pour la deuxième phase (annexe 1). L'arasement de structures moins résistantes entraînent une dilatance moins élevée.

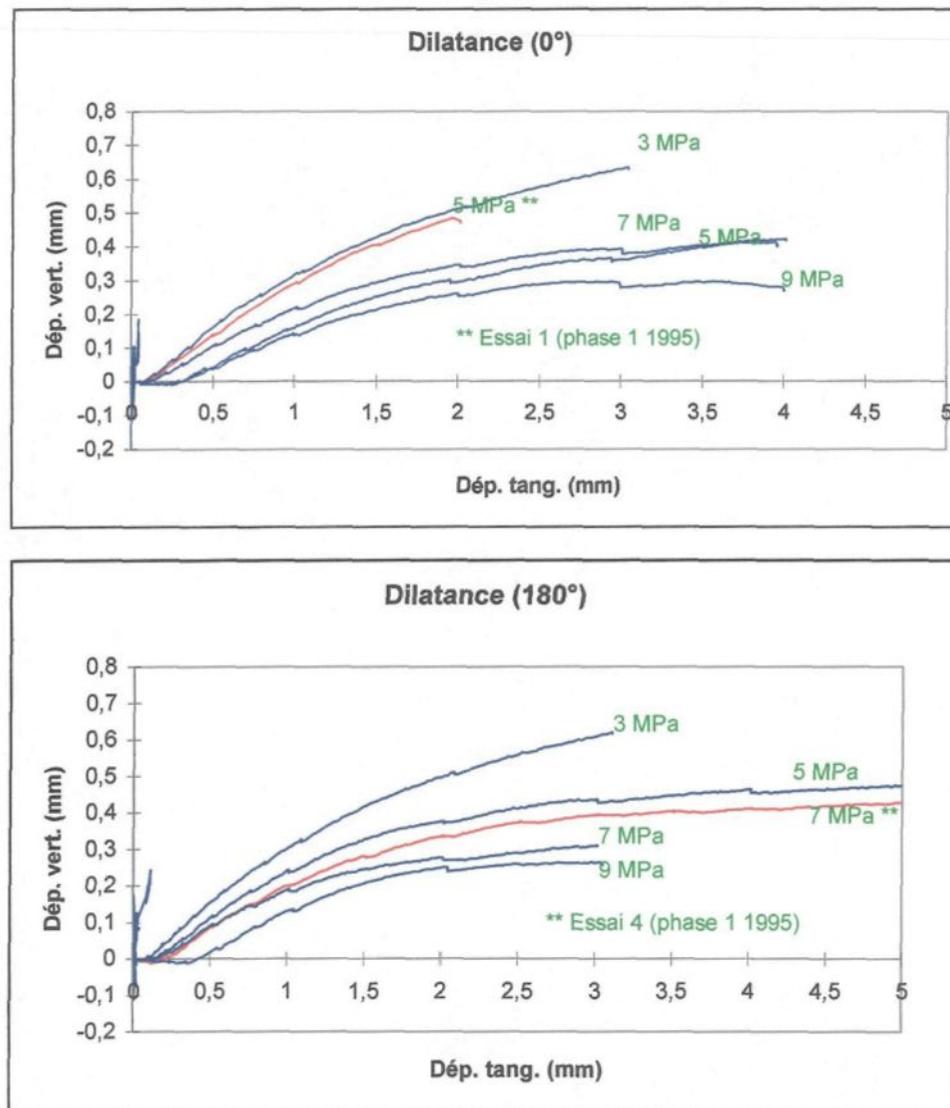


Figure 6.1: Courbes de dilatance pour les essais dans les directions 0° et 180°.

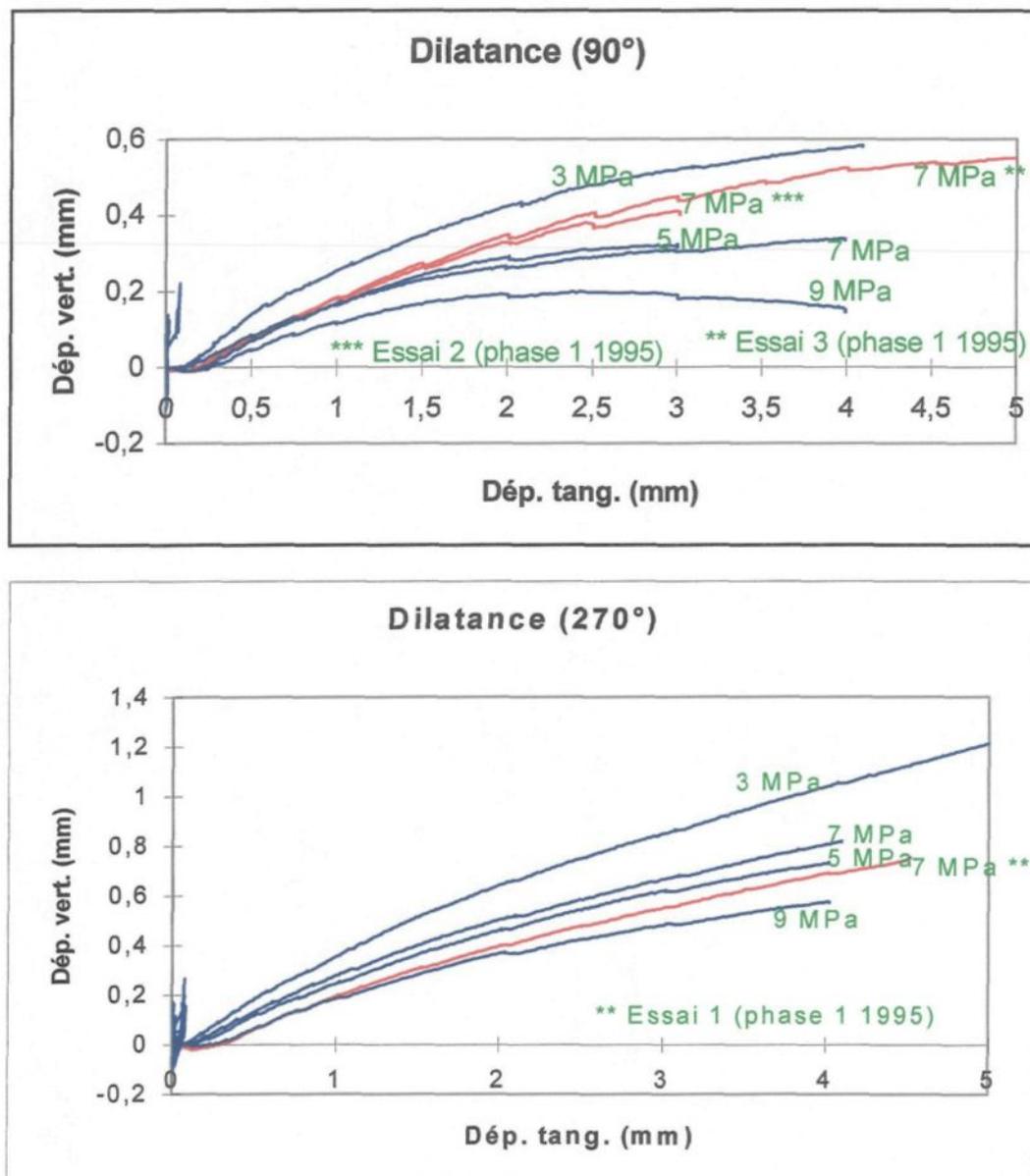


Figure 6.2: Courbes de dilatance pour les essais dans les directions 90° et 270°.

L'observation des premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel des courbes de dilatances permet de constater que la contractance observée lors des essais de la première phase a presque disparue (figure 6.3, 6.4 et annexe 12). Par contre, pour toutes les directions de cisaillement, nous observons un palier, avant la mobilisation de la dilatance, qui augmente avec la contrainte normale. Ce palier est très court pour les essais à 3 MPa de contrainte normale (0.02 à 0.1 mm de déplacement tangentiel) et augmente jusqu'à 0.3 mm pour une contrainte normale de 9 MPa (figure 6.3, 6.4 et annexe 9). On note aussi que les trois essais problématique du palier de contrainte de 5 MPa (0° , 90° et 270°) montrent des paliers anormalement longs. Cette constatation peut être reliée à l'opération de mise en place de la fracture appliquée après les quatre premiers essais du palier de contrainte normale de 5 MPa.

L'analyse des courbes de dilatance par niveau de contrainte normale 3, 7 et 9 MPa (figure 6.5 et annexe 9) permet d'observer que la fracture se dilate davantage dans la direction de 270° . La direction opposée (090°) montre une plus faible dilatance. Les directions opposées 0° et 180° démontrent sensiblement les mêmes comportements dilatants se situant entre les courbes maximum et minimum des directions 270° et 90° . L'essai à 180° et sous une contrainte normale de 7 MPa montre un comportement dilatant global un peu plus faible que supposé. Les éprouvettes témoins représentant les deux épontes (rose et grise) montrent des résistances en compression uniaxiale de 76.2 et 59.7 MPa. Comme mentionné précédemment, ce différentiel important peut avoir engendré un

comportement dilatant quelque peu différent par l'arasement de structures moins résistantes. Pour le palier de contrainte normale de 5 MPa, nous notons au début des courbes, que l'ordre d'importance de la dilatance selon les différentes directions de cisaillement établi aux autres paliers de contraintes n'est pas respecté. À partir du déplacement tangentiel de 1 mm, le problème se résorbe (figure 6.6) pour finalement montrer un ordre d'importance de la dilatance pareil aux autres paliers de contraintes. D'après cette constatation, nous remarquons que mis à part le début des essais, les courbes de dilatance aux paliers de contraintes de 5 MPa se sont comportées d'une façon similaire aux autres courbes des autres paliers de contrainte normale. Pour les courbes de la première phase (courbe rouge de la figure 6.5, 6.6), on remarque principalement, au palier de contrainte de 7 MPa, un rapprochement des dilatances selon les quatre directions. On note aussi que l'ordre établi par rapport aux directions de cisaillement est moins marqué.

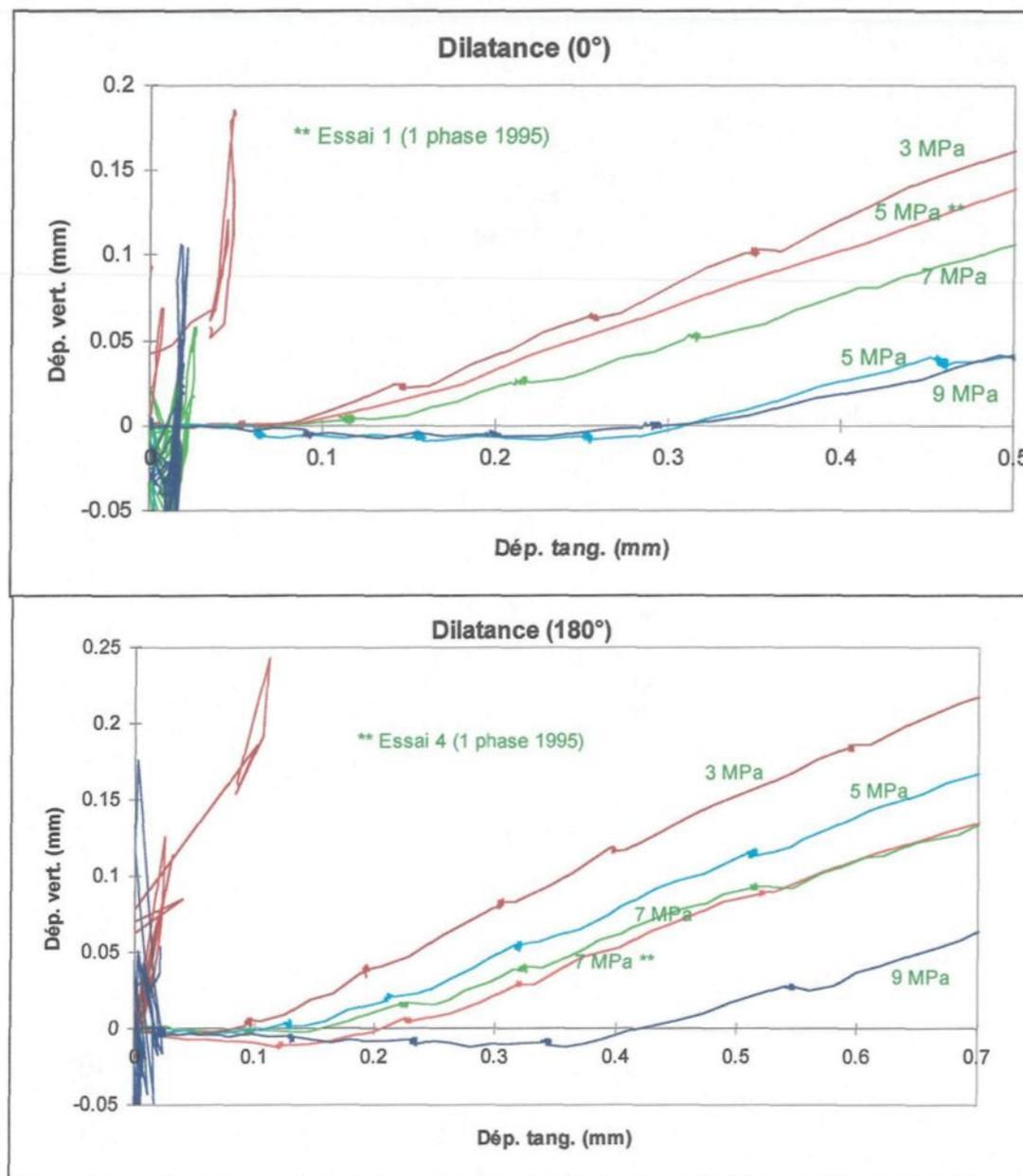


Figure 6.3: Premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangential des courbes de dilatances des directions 0° et 180°.

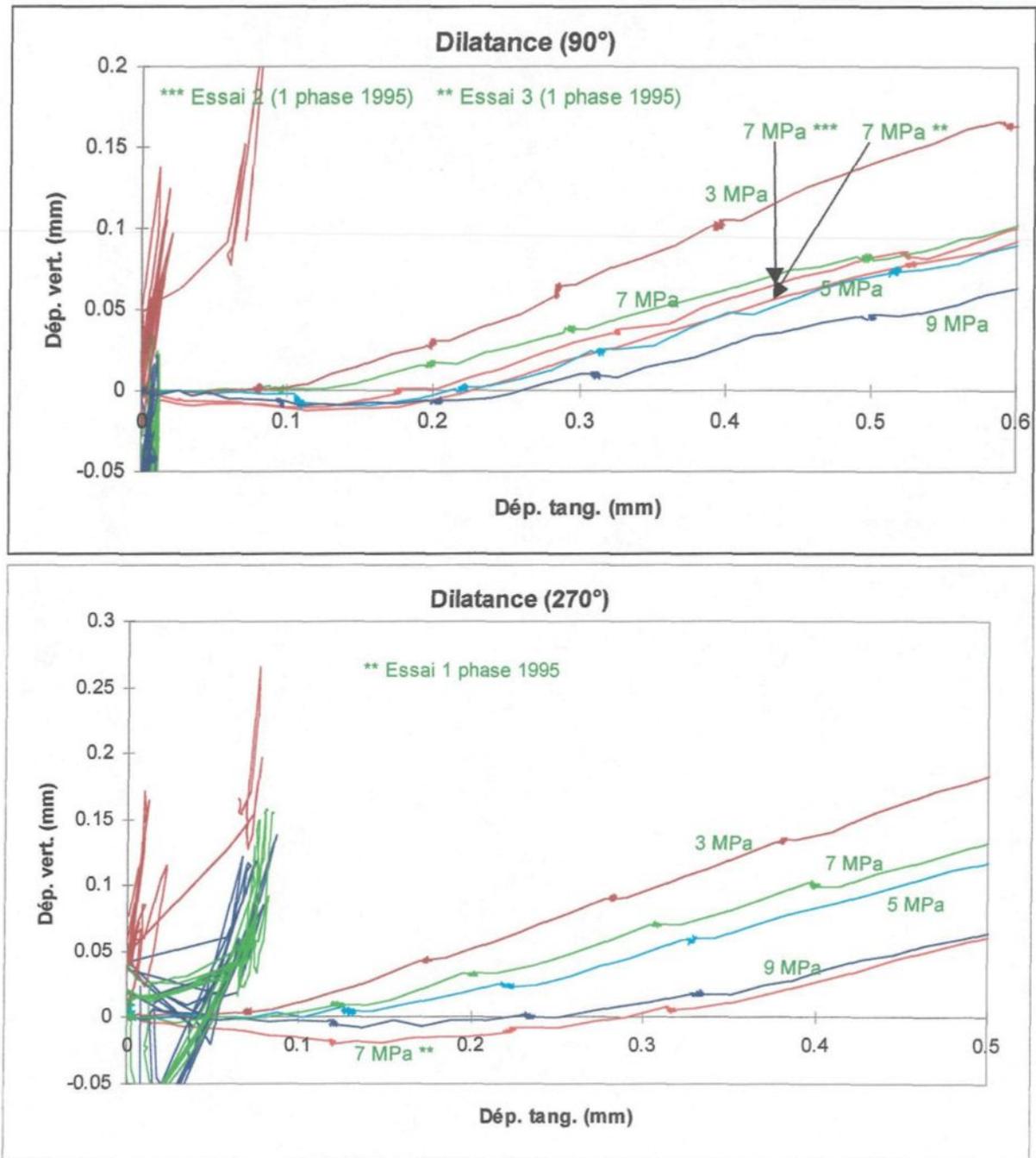


Figure 6.4: Premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangential des courbes de dilatances des directions 90° et 270°.

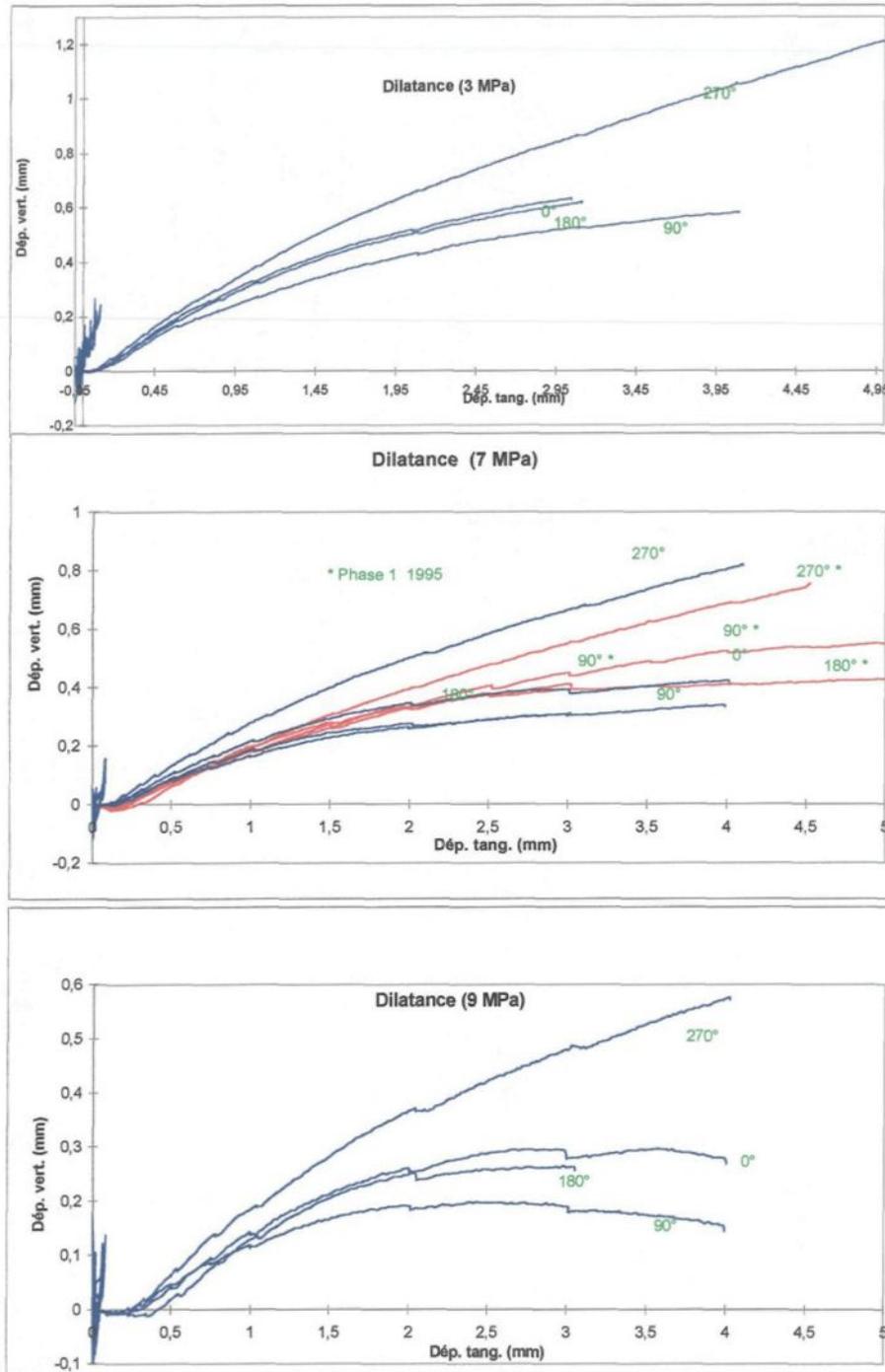


Figure 6.5: Courbes de dilatance par niveau de contrainte normale.

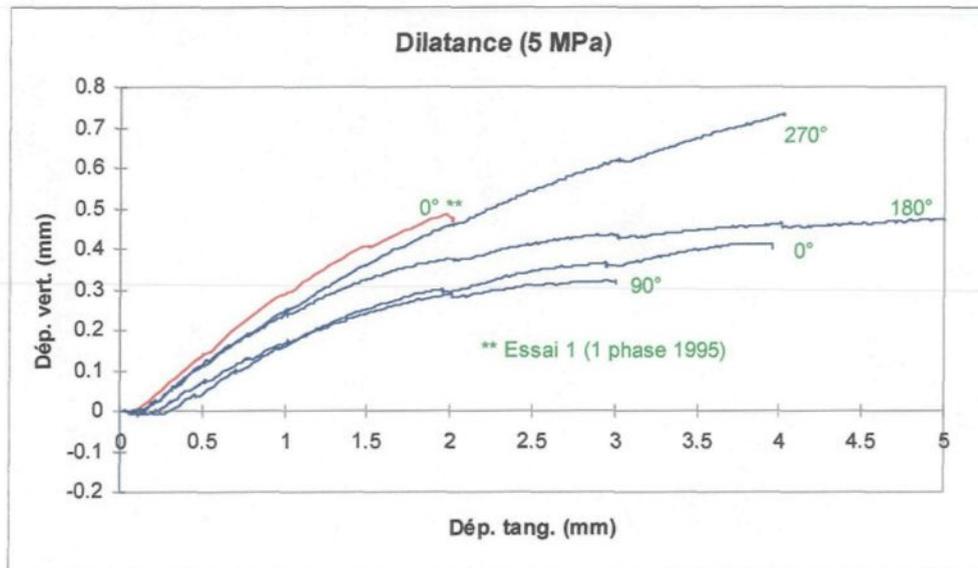


Figure 6.6: Courbes de dilatance pour le niveau de contrainte normale 5 MPa.

L'examen du comportement de la dilatance aux différentes phases mécaniques permet d'observer:

- 1) l'effet de palier décrit précédemment pour la mobilisation du frottement;
- 2) la phase de mobilisation de la dilatance qui se manifeste par des variations de α_{\max} entre 18.9° et 22° (sous 3 MPa de contrainte normale), entre 12.9° et 15.9° (sous 5 MPa de contrainte normale), entre 12.1° et 17.1° (sous 7 MPa de contrainte normale) et entre 9.7° et 13° (sous 9 MPa de contrainte normale) (figure 6.7). Les valeurs obtenues lors des essais de 1995 ($\alpha_{\max} = 14^\circ$ à 16°), sous 7 MPa de contrainte normale sont comprises dans les valeurs mentionnés plus haut. Mis à part les problèmes reliés aux

essais du niveau de contrainte normale de 5 MPa, on remarque que l'angle de la mobilisation de la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale.

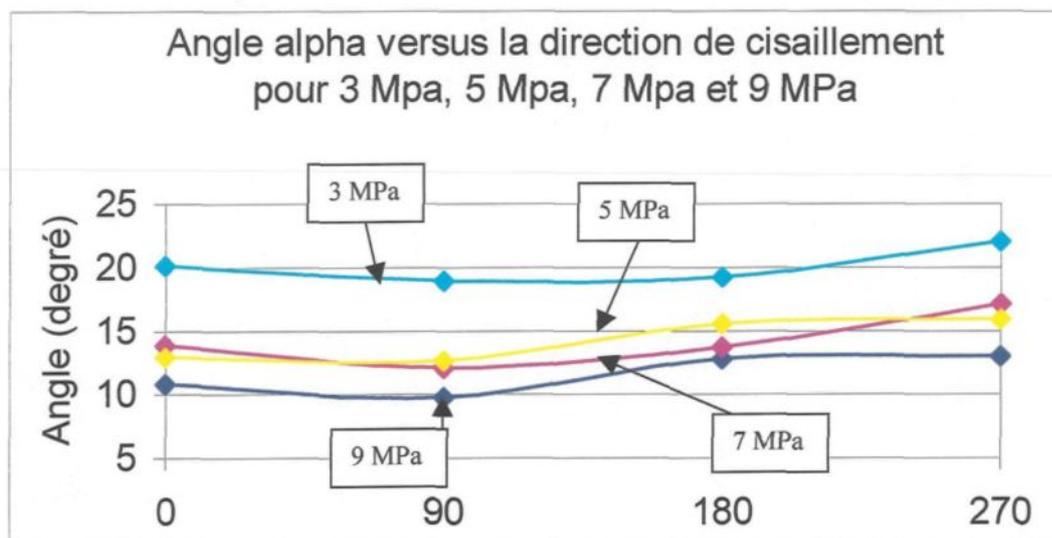


Figure 6.7 : Angle alpha versus la direction de cisaillement.

- 3) le pic de cisaillement apparaît à un déplacement tangentiel variant entre 0.185 et 0.342 mm (sous 3 MPa de contrainte normale), entre 0.28 et 0.5 mm (sous 5 MPa de contrainte normale), entre 0.239 et 0.374 mm (sous 7 MPa de contrainte normale) et entre 0.396 et 0.655 mm (sous 9 MPa de contrainte normale) (figure 6.8). Les valeurs obtenues lors des essais de 1995, sous 7 MPa de contrainte normale, sont comprises aussi dans les valeurs mentionnés. Comme nous pouvons voir à la figure 6.8, aucune tendance se dégage de la quantité de dilatance au pic versus les différentes directions de cisaillement aux différents paliers de contrainte normale. Sur la même figure, les courbes indiqués par le chiffre 2 sont représentés par les valeurs de dilatance au pic desquelles nous avons soustrait la phase initiale de palier. Malgré ces corrections, aucune tendance ne se dégage de ces courbes.

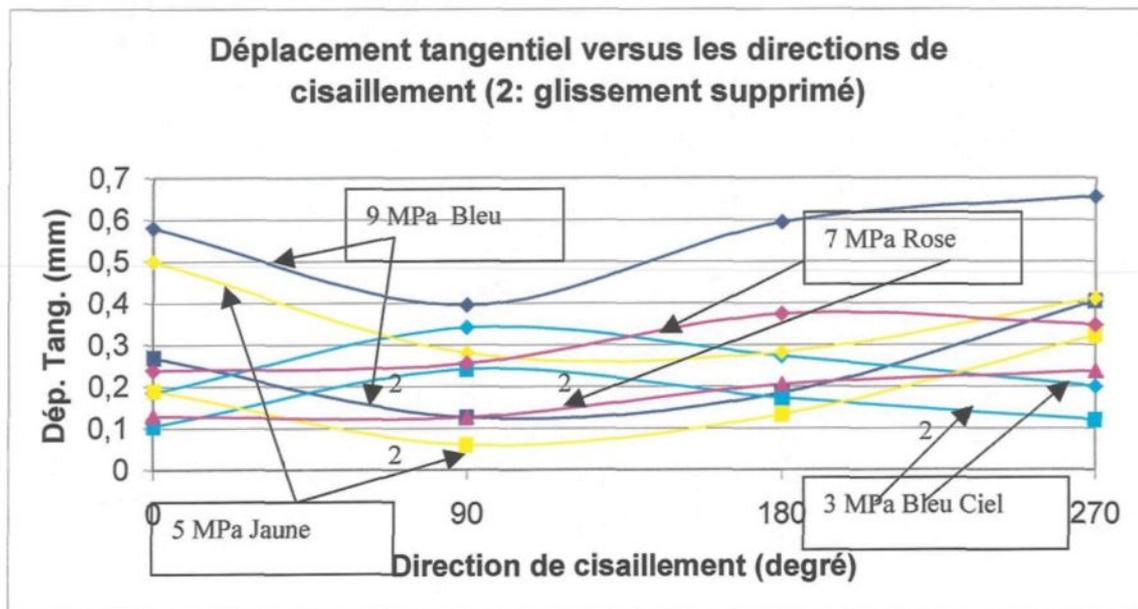


Figure 6.8 : Déplacement tangentiel versus les différentes directions de cisaillement.

Les résistances de cisaillement au pic obtenues concordent très bien avec l'augmentation de la contrainte normale (voir figure 6.9 et tableau 1 en annexe 9). On note aussi que généralement, peu importe le niveau de contrainte normale, les essais dans la direction 270° montrent les plus fortes résistances au cisaillement au pic alors que ceux dans la direction 90° montrent les résistances les plus faibles. Les deux autres directions (0° - 180°) montrent des résistances au cisaillement au pic intermédiaire (voir figure 6.9). Le seul essai qui ne suit pas ces tendances, est celui à 7 MPa dans la direction 180° . En regardant les résistances au pic versus la quantité de dilatance, on note que les essais dans la direction 270° montrant les plus grandes résistances au pic montrent aussi les plus grandes dilatances. Inversement, on note aussi que les essais

montrant les plus faibles résistances au pic engendrent aussi les plus faibles dilatances. Ces résultats entraînent que pour des essais de cisaillement sous contrainte normale constante, la dilatance et la résistance au cisaillement au pic sont directement proportionnelle. L'essai à 7 MPa dans la direction 180° montre tout à fait le contraire; une résistance de cisaillement au pic plus forte pour une dilatance plus faible que supposé. En comparaison des autres essais, il est probable que la différence de résistance entre les deux épontes (témoins de 76.2 et 59.7 MPa) a entraîné un cisaillement global différent (ex. arasement de structures moins résistantes sur l'éponte montrant la plus faible résistance). En observant sur la même figure les courbes rouges représentant les essais de la phase 1, on remarque des résistances plus élevés selon les différentes directions de cisaillement. Mettant en parallèle les résultats en compression uniaxiale sur les éprouvettes témoins des deux phases (87 versus 74 MPa), il est tout à fait logique d'obtenir de tel résultat. De plus, ces résultats de la première phase concorde très bien avec l'ordre établie quant à la résistance au pic en fonction des différentes directions de cisaillement.

- 4) la phase de résistance au cisaillement résiduel apparaît à environ 1.5 mm pour les essais à 3 MPa de contrainte normale, à 2 mm pour ceux à 5 et 7 MPa et 2.5 mm pour ceux à 9 MPa. Pour les résistances au cisaillements de la phase résiduelle, les mêmes tendances sont observés que celles dénotés au pic (figure 6.9). La dilatance dans la phase résiduelle varie en fonction de la direction de cisaillement et de la contrainte normale. Dans la direction 0° et la direction opposée de 180° , la dilatance devient presque nulle

aux contraintes normales de 5, 7 et 9 MPa avec 2.5 à 3 mm de déplacement tangentiel (figure 6.1 et 6.2). Pour 3 MPa de contrainte normale, la progression de la dilatance se poursuit. Dans la direction 90° , la dilatance augmente toujours à 3 MPa de contrainte normale, augmente faiblement à 5, 7 MPa de contrainte normale et est nulle à 9 MPa de contrainte normale. Dans la direction 270° , la dilatance augmente toujours pour tous les niveaux de contrainte normale. Ces résultats démontrent que généralement, pour notre fracture à la phase du résiduel, l'augmentation de la contrainte normale vient annulé l'effet de la dilatance. Par contre, cet effet ne se fait pas sentir dans la direction 270° . La situation particulière du comportement de la dilatance pour la direction 270° est liée sans doute au fait que le plan moyen de la fracture dans cette direction démontre une pente ascendante dans la direction du cisaillement (voir chapitre 4 caractérisation morphologique).

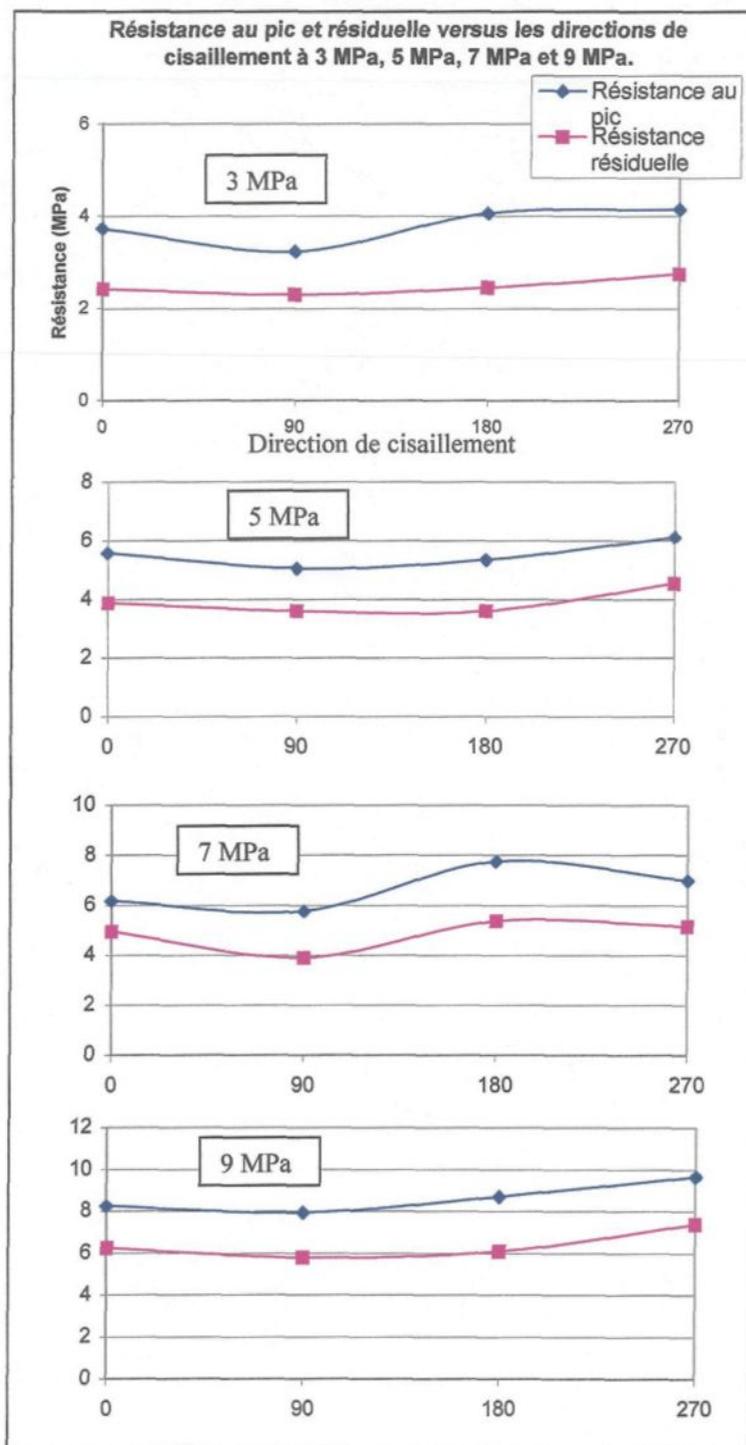


Figure 6.9: Résistance au pic et au frottement résiduel versus les différentes directions de cisaillement.

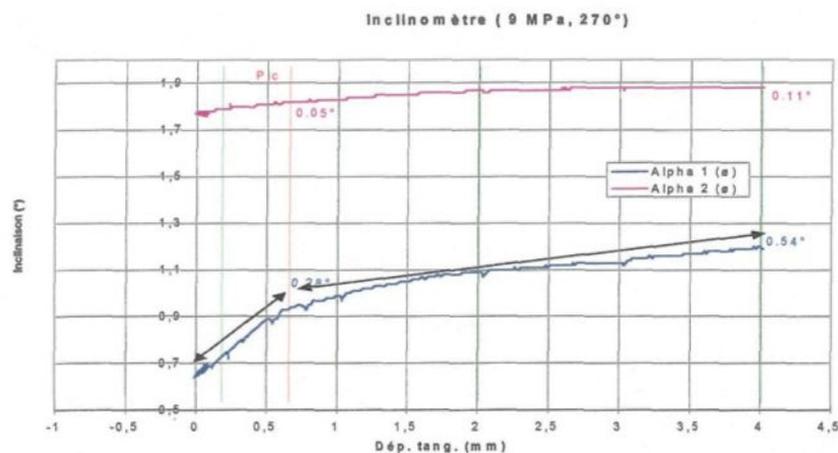
L'annexe 9 et la figure 6.10 présentent le comportement des inclinomètres en fonction du déplacement tangentiel. L'inclinomètre Alpha 2, perpendiculaire à la direction de cisaillement, montre avec l'augmentation du déplacement tangentiel, des variations négligeables. Pour l'inclinomètre, Alpha 1, parallèle à la direction de cisaillement, on remarque une augmentation de l'angle représentant un basculement de la demi-boîte supérieure (sens de la traction) vers l'avant de la machine de cisaillement. Selon l'importance de la croissance de l'angle, les courbes peuvent se diviser en deux parties. Une première partie avant le pic de résistance au cisaillement (ligne rouge de la figure 6.10 représente le pic) et l'autre partie représentant le reste de la courbe. La partie avant le pic de résistance au cisaillement montre une pente plus prononcée, malgré une dilatance presque nulle dans les premiers dixièmes de millimètres de déplacement tangentiels. La figure 6.11 montre la similitude évidente entre les déplacements tangentiels correspondants au changement de pente des inclinomètres alpha 1 et celles correspondants au pic de résistance en cisaillement de l'ensemble des essais.

Afin de mieux comprendre le comportement de l'inclinomètre Alpha 1, qui se trouve dans la direction de cisaillement, une série de tests a été réalisée avec des échantillons à surface plane qui sont présentés à l'annexe 8. Les résultats de ces essais montrent qu'avec des surfaces planes il n'y a pas de basculement de la demi-boîte supérieure. Toutefois, on remarque encore un petit basculement correspondant aux portions de courbes avant le pic de résistance au cisaillement. Des résultats des essais présentés à l'annexe 8, on peut

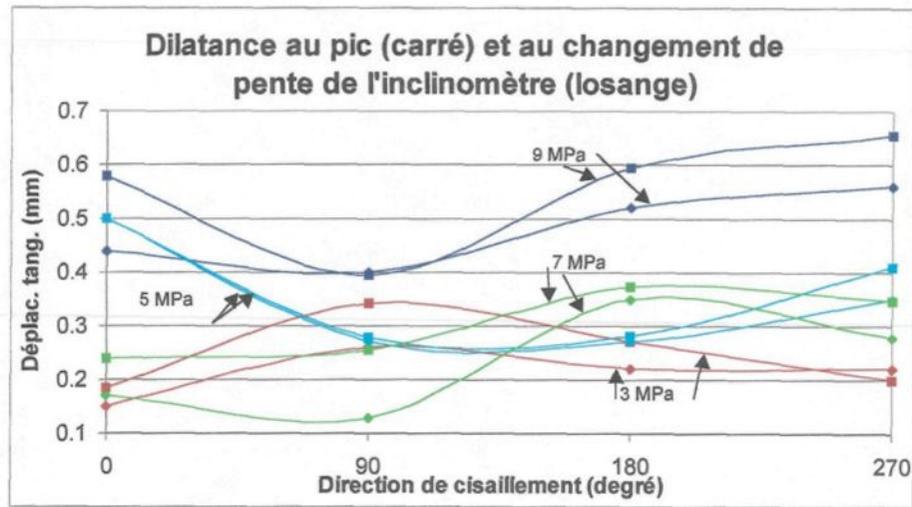
déduire que le comportement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement est dû à la morphologie de la surface cisailée.

À la figure 6.12, nous avons positionné sur le même graphique les angles de basculements au pic et à un déplacement tangentiel de 3 mm pour les différentes directions de cisaillement au quatre niveaux de contrainte normale. On voit que l'angle alpha au pic est plus élevé dans la direction 270° et pour le palier de 9 MPa. La même constatation peut être faite pour l'angle alpha correspondant au déplacement tangentiel de 3 mm. D'après la caractérisation morphologique du chapitre 4, on voit qu'un parallèle peut être établi entre la variation de l'angle de l'inclinomètre au différentes directions de cisaillement et les structures des surfaces des épontes de la fracture.

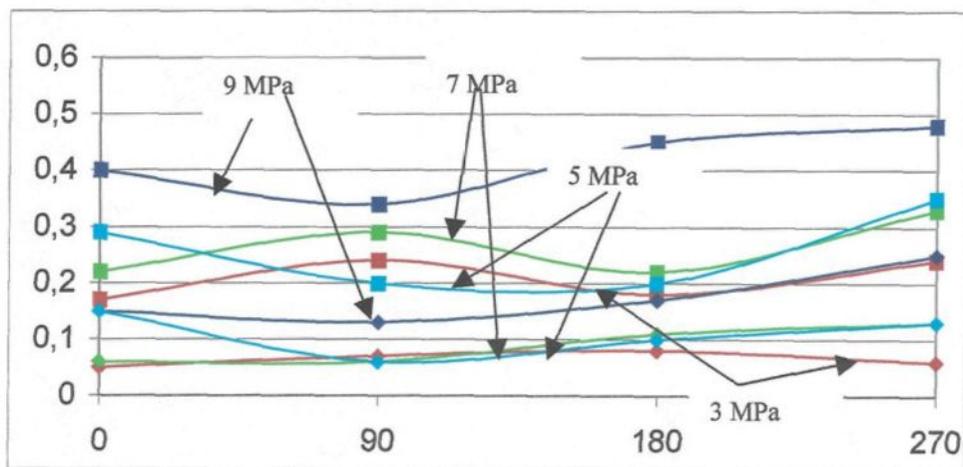
Finalement, il faut mentionner que l'emplacement de l'inclinomètre n'est pas axé par rapport au centre de la fracture.



6.10: Exemple de courbes montrant le comportement des inclinomètres en fonction du déplacement tangentiel.



6.11: Similitude évidente entre les déplacements tangentiels correspondants au changement de pente des inclinomètres alpha 1 et celles correspondants au pic de résistance en cisaillement de l'ensemble des essais.



6.12: Angles de basculements au pic et à un déplacement tangentiel de 3 mm pour les différentes directions de cisaillement au quatre niveaux de contrainte normale (Carré au pic; Losange frottement résiduel de 3mm).

Application de la contrainte normale et capteur de déplacement vertical

On remarque, pour tous les débuts d'essais (juste après la mise en place de la fracture), que la fracture est plus refermée vers l'avant de la machine de cisaillement. Cela est probablement dû au fait que la contrainte normale n'est pas appliquée exactement dans l'axe, mais toujours un peu plus vers l'avant de la machine de cisaillement. Cette constatation a pu être faite en notant, pour chaque essai, à l'aide d'un jeu de cales identiques, les écarts entre les demi-boîtes (supérieure et inférieure) de la machine de cisaillement.

De plus, lors de la mise en place (tous les essais) dans la machine de cisaillement, on note jusqu'à environ 3 MPa de contrainte normale, la fermeture de la fracture. Puis, la fracture semble s'ouvrir malgré l'augmentation de la charge. Donc, lors du chargement, le capteur de déplacement vertical enregistre des déplacements négatifs de la fracture jusqu'à 3 MPa, puis des déplacements positifs jusqu'à 9 MPa. La figure 6.13 montre le comportement de la fracture enregistré par un capteur de déplacement vertical probablement non axial. Cette inversion à environ 3 MPa est aussi noté par l'inclinomètre parallèle à la direction de cisaillement. Donc jusqu'à environ 3 MPa, la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement est plus refermé vers l'arrière et par la suite avec l'augmentation de la contrainte normale, il y a basculement de la demi-boîte vers l'avant. Étant donné que ce phénomène se produit dans les quatre directions de cisaillement, la solution la plus plausible est probablement relié à l'appareillage utilisé.

Donc en résumé, le comportement mécanique démontre que:

- 1) il apparaît un palier ou une faible contractance, avant la mobilisation de la dilatance, qui s'allonge avec l'augmentation de la contrainte normale;
- 2) la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale;
- 3) l'angle de la mobilisation de la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale;
- 4) avec le cisaillement, la fracture se dilate davantage dans la direction de 270° , le moins dans la direction opposée et (moyennement) de façon égale dans les deux autres directions;
- 5) de même la résistance au cisaillement est la plus forte dans la direction de 270° , est la moins élevée dans la direction opposée et entre les deux précédentes dans les deux autres directions;
- 6) la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale;
- 7) au résiduel, l'augmentation de la contrainte normale annule la dilatance dans les directions 0° - 180° et la dilatance augmente toujours selon la direction 270° ;
- 8) les courbes des inclinomètres peuvent séparées en deux parties distinctes avant et après le pic de cisaillement;
- 9) au pic et à un déplacement tangentiel de 3 mm, l'angle de l'inclinomètre parallèle au cisaillement est plus élevé dans la direction 270° et aussi pour le niveau de contrainte de 9 MPa.

Donc la structure de grande dimension présentée à la fin du chapitre 4 (plan moyen ascendant (éponge inférieure rose) dans la direction 270°) joue un rôle de premier plan par rapport aux différents résultats mécanique obtenus.

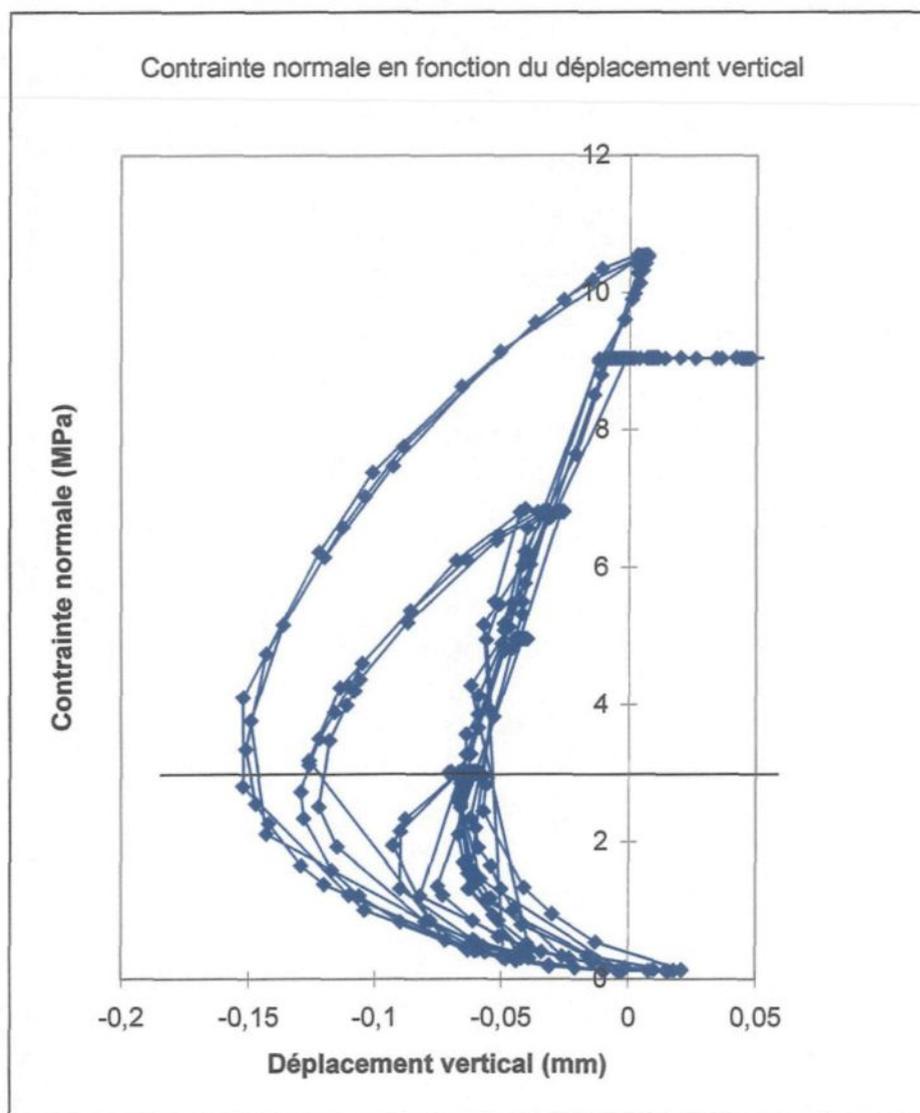


Figure 6.13: Inversion dans la fermeture de la fracture.

6.3 Comportement hydraulique global

Pour l'examen du comportement général de la transmissivité intrinsèque globale, de l'ensemble des essais, la figure 6.14 rassemble toutes les courbes d'un débit de 1 l/h. On constate que, pour l'ensemble des essais, la transmissivité intrinsèque globale est comprise entre des courbes enveloppes d'environ un ordre de grandeur (figure 6.14). Ces courbes enveloppes ont la particularité d'augmenter d'environ deux ordres de grandeur dans le premier millimètre de déplacement tangentiel et se stabiliser rapidement par la suite.

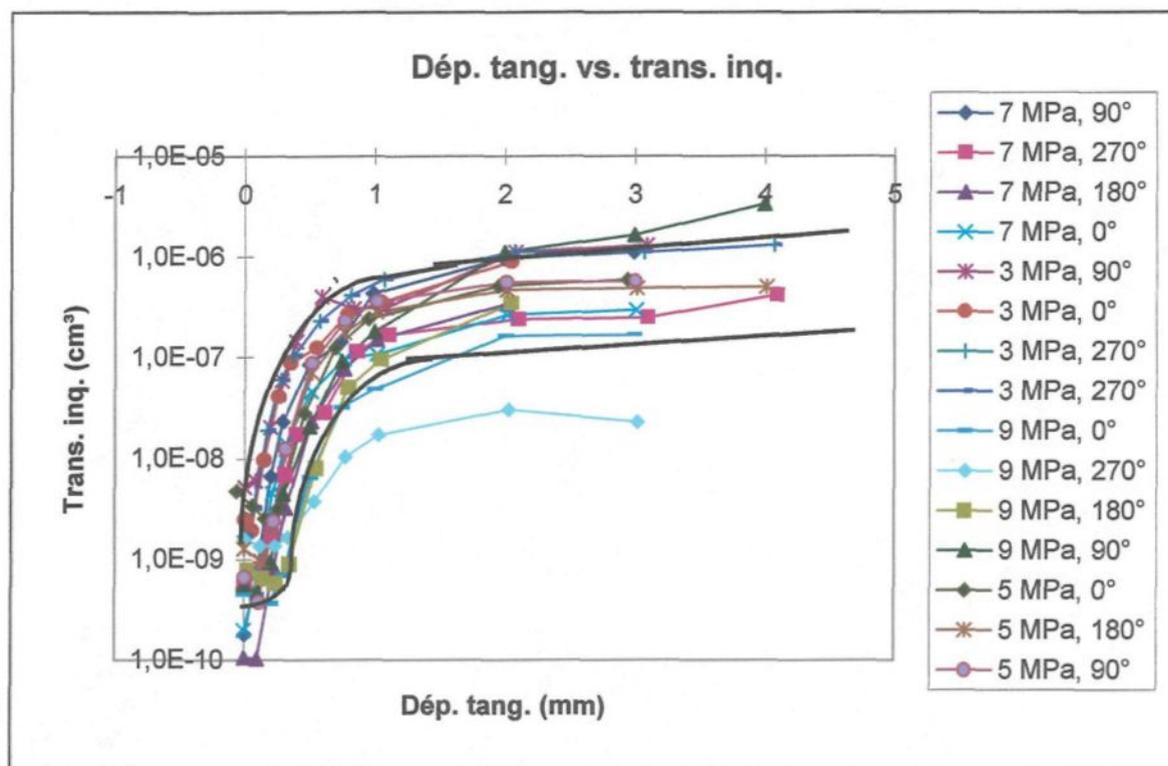


Figure 6.14: Transmissivité intrinsèque globale pour tous les essais (injection de 1 l/h).

6.3.1 Transmissivité globale en début d'essai

Nous avons placé sur le graphique 6.15 la transmissivité globale obtenue en début d'essai aux différents paliers de contrainte normale en fonction des différentes directions de cisaillement. La variation maximale obtenue équivaut à une ouverture hydraulique de la fracture variant entre 11 et 39 microns. Même si on remarque une certaine tendance de la fermeture de la fracture en fonction du palier de contrainte normale (plus petite transmissivité intrinsèque avec l'augmentation de la contrainte normale, il reste que ce graphique montre une variation initiale significative. Ces résultats reflètent l'extrême sensibilité des phénomènes hydrauliques en comparaison des paramètres mécaniques initiaux beaucoup mieux ordonnés en fonction du niveau de contrainte normale et de la direction de cisaillement.

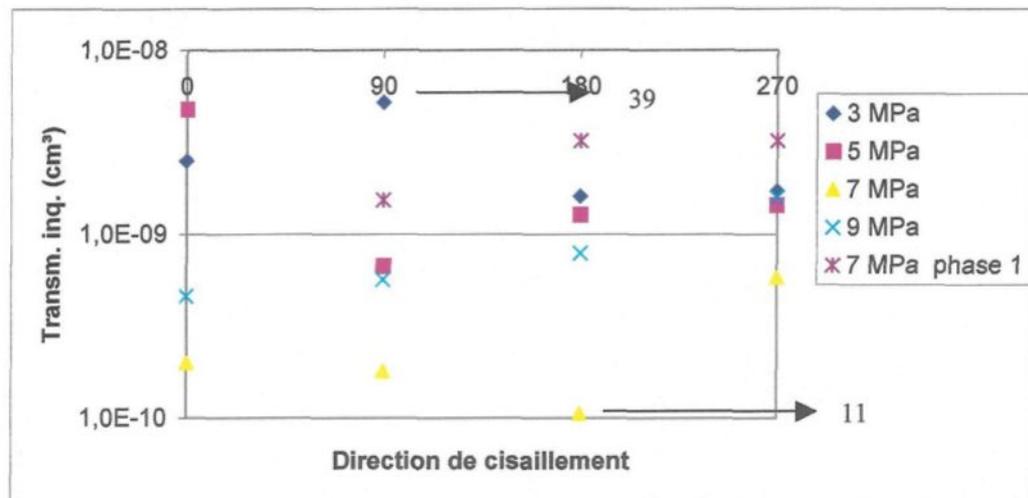


Figure 6.15: Transmissivité intrinsèque en fonction des directions de cisaillement pour les différents paliers de contrainte normale.

6.3.2 Transmissivité globale en fonction des phases de cisaillement

L'analyse de la transmissivité intrinsèque globale, en relation avec les principales phases mécanique de cisaillement de la fracture a été effectuée en positionnant sur un même graphique, pour chacun des essais, les courbes de comportement en cisaillement et de dilatance et les courbes hydrauliques (transmissivité intrinsèque globale). Ces courbes sont présentées à l'annexe 10 par niveau de contrainte normale et direction de cisaillement croissante. L'analyse de l'ensemble de ces courbes (hydraulique-mécanique) permet la division de ces dernières en quatre segments (figure 6.16); 1) avant la mobilisation de la dilatance; 2) la dilatance jusqu'au pic; 3) le pic de cisaillement avec la phase de ramollissement et 4) le frottement résiduel.

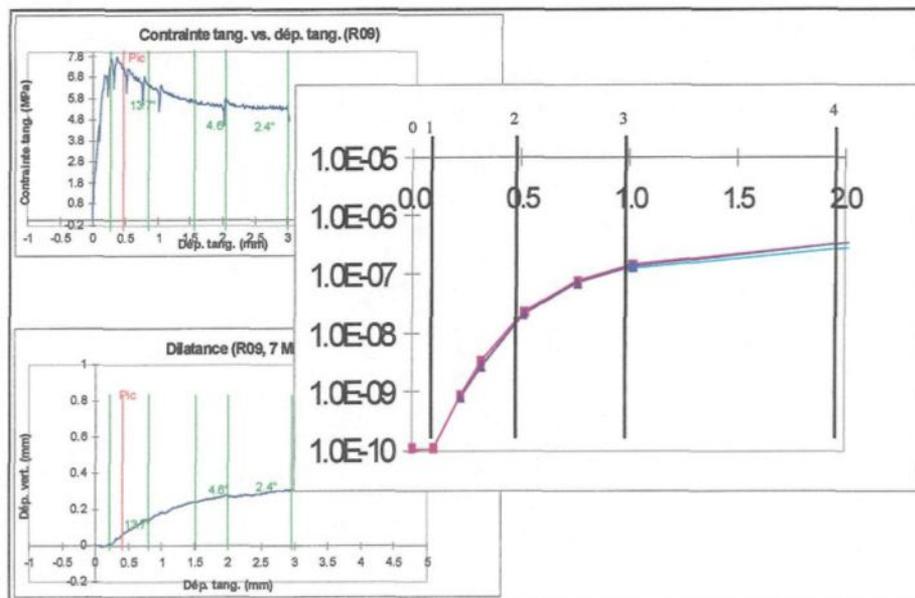


Figure 6.16: Phases (0-1, 1-2, 2-3, 3-4) de la transmissivité intrinsèque globale en cm^3 en fonction du déplacement tangentiel en millimètre.

Dans les premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel (avant la mobilisation de la dilatance 0 à 0.2 mm), aux niveaux de contraintes normales de 3, 7, et 9 MPa, la transmissivité intrinsèque suit sensiblement le même comportement que les courbes de dilatance (figure 6.16 et annexe 10). C'est-à-dire qu'elle augmente légèrement aux paliers de contraintes 3 et 7 MPa et est plutôt stable au niveau de contrainte normale 9 MPa. Pour le niveau de contrainte normale 5 MPa, on remarque, pour les quatre directions, une contractance. Cette contractance similaire à celle des essais de 1995 reflète très bien la modification dans le protocole par l'ajout d'une procédure de mise en place.

La figure 6.17 montre la résultante de la transmissivité intrinsèque (valeur au palier correspondant à un déplacement tangentiel de 0.1 à 0.3 mm moins la valeur initiale) obtenue pour les différents niveaux de contrainte normale en fonction des différentes directions de cisaillement. Les essais de 1995 (première phase) sans mise en place montrent des nettes différences avec ceux de la deuxième phase. Les quatre essais du palier de contrainte normale de 5 MPa (deuxième phase) qui ont subi une tentative de mise en place par essais de fatigue montrent une contractance un peu supérieure à ceux des autres paliers de contrainte normale. Nous remarquons aussi une tendance à la contractance avec l'augmentation de la contrainte normale.

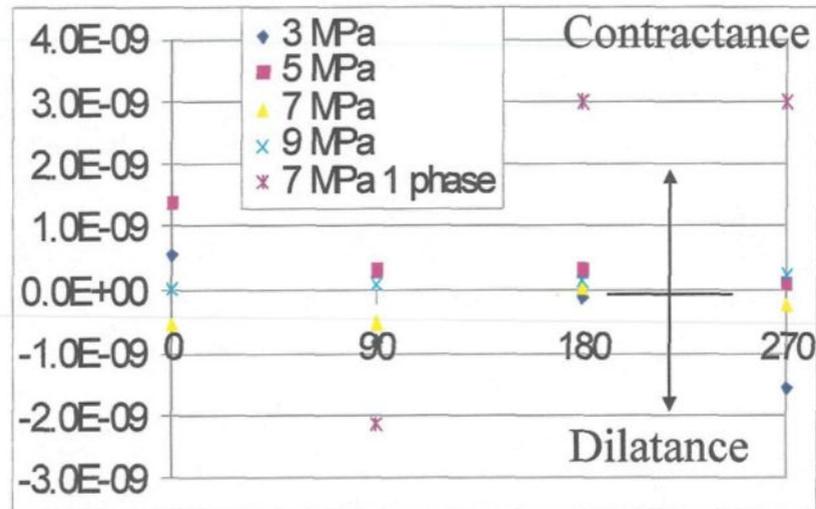


Figure 6.17: Différence en cm^3 entre les valeurs de transmissivité intrinsèque globale (0.1 mm à 0.3 mm de déplacement tangentiel) et celles de début d'essai en fonction des directions de cisaillement pour les différents niveaux de contrainte normale.

Donc d'après cette figure, il est clair qu'un parallèle peut être établi entre la mise en place initiale et la quantité de contractance engendré dans les premiers dixièmes de millimètres de déplacement tangentiel.

Au-delà de cette première phase, la dilatance est mobilisée et se traduit par une augmentation de la transmissivité intrinsèque jusqu'au pic de un à deux ordres de grandeur (figure 6.18) (pente constante d'augmentation de la transmissivité intrinsèque globale).

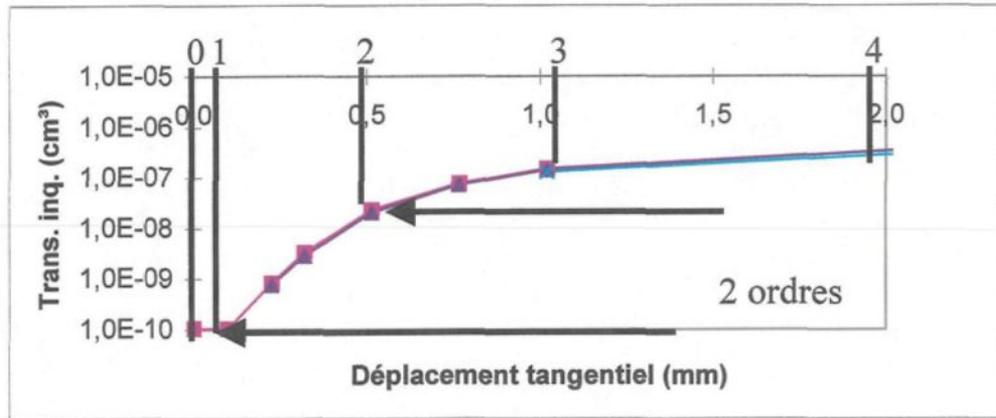


Figure 6.18: Phase de forte augmentation de la transmissivité intrinsèque globale en fonction du déplacement tangentiel.

Après le pic, dans la phase de ramollissement provoquée par la dégradation des aspérités, la pente de la courbe de la transmissivité intrinsèque diminue progressivement (figure 6.19). Il est à noter que l'inflexion dans la pente de la courbe de dilataance se produit à un déplacement tangentiel plus élevé que dans le cas de la courbe de la transmissivité intrinsèque où cette inflexion se produit plutôt à proximité du pic.

Par la suite au frottement résiduel (figure 6.20), dépendamment de la direction de cisaillement, la pente de la courbe de la transmissivité intrinsèque se stabilise ou augmente légèrement (entre 1; 1,5 mm de déplacement tangentiel). Il est à noter que les trois premières subdivisions sont peu influencées par la direction de cisaillement.

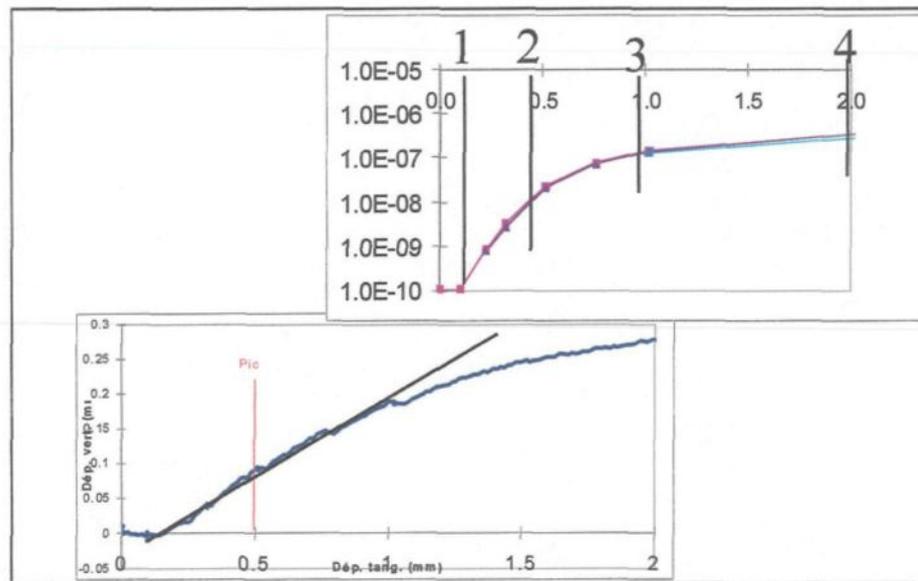


Figure 6.19: Phase d'inflexion de la transmissivité globale en fonction du déplacement tangentiel.

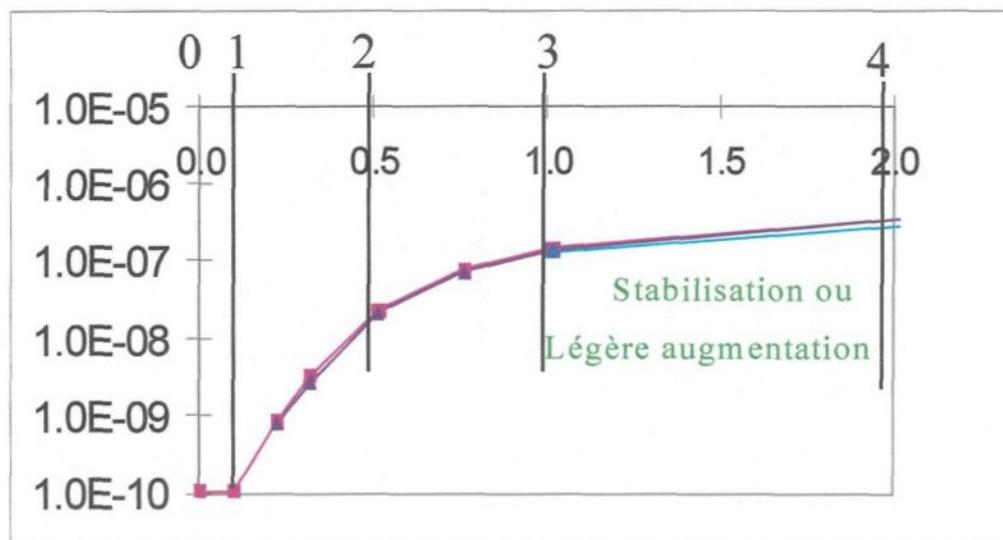


Figure 6.20: Phase de stabilisation ou de légère augmentation de la transmissivité globale en fonction du déplacement tangentiel.

6.3.3 Transmissivité intrinsèque globale par niveau de contrainte normale

L'examen du comportement de la transmissivité intrinsèque globale par niveau de contrainte normale, comparé à celui de la dilatance, permet de constater un comportement beaucoup plus isotropique. La figure 6.21 montre les courbes à 3 MPa de contrainte normale pour laquelle, peu importe la direction de cisaillement, le comportement de la transmissivité intrinsèque est très similaire (isotrope) et il en est ainsi à la figure 6.21 pour les courbes à 5 MPa de contrainte normale à l'exception de la direction de cisaillement 270° où la transmissivité intrinsèque est plus faible. La figure 6.22 montre les courbes à 7 MPa de contrainte normale dont la courbe dans la direction 90° montre un niveau plus élevé alors qu'on peut noter un comportement isotropique de la transmissivité intrinsèque pour les directions 0° , 180° et 270° . Les courbes à 9 MPa de contrainte normale (figure 6.22) permet d'observer, que pour ce palier de contrainte normale, les comportements de la transmissivité intrinsèque sont différents (anisotropie) pour les diverses directions de cisaillement. La plus haute transmissivité intrinsèque observée est reliée à la direction 90° , alors que la plus faible se retrouve dans la direction de cisaillement 270° . Les deux autres directions opposées (0° et 180°) ont des transmissivités intrinsèques similaires intermédiaires entre celles à 90° et 270° . Nous remarquons, pour ce palier de contrainte, que le comportement de la transmissivité intrinsèque est sensiblement le même que celui de la dilatance, mais la direction montrant la plus grande dilatance démontre la transmissivité intrinsèque la plus faible, alors que la direction caractérisée par une moins grande dilatance démontre la transmissivité intrinsèque la plus élevée.

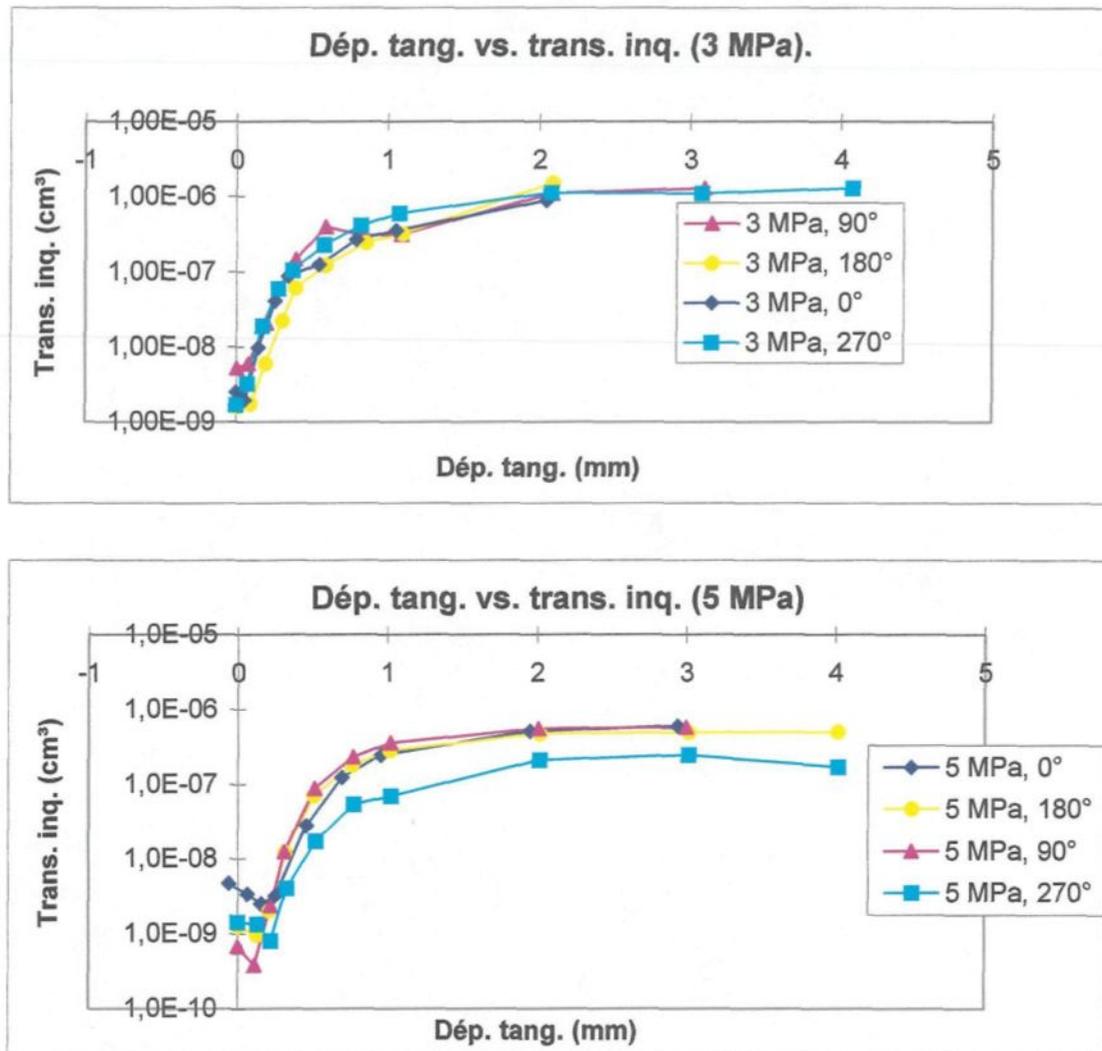


Figure 6.21: Transmissivité intrinsèque en fonction du déplacement tangential pour les niveaux de contrainte normale de 3 et 5 MPa.

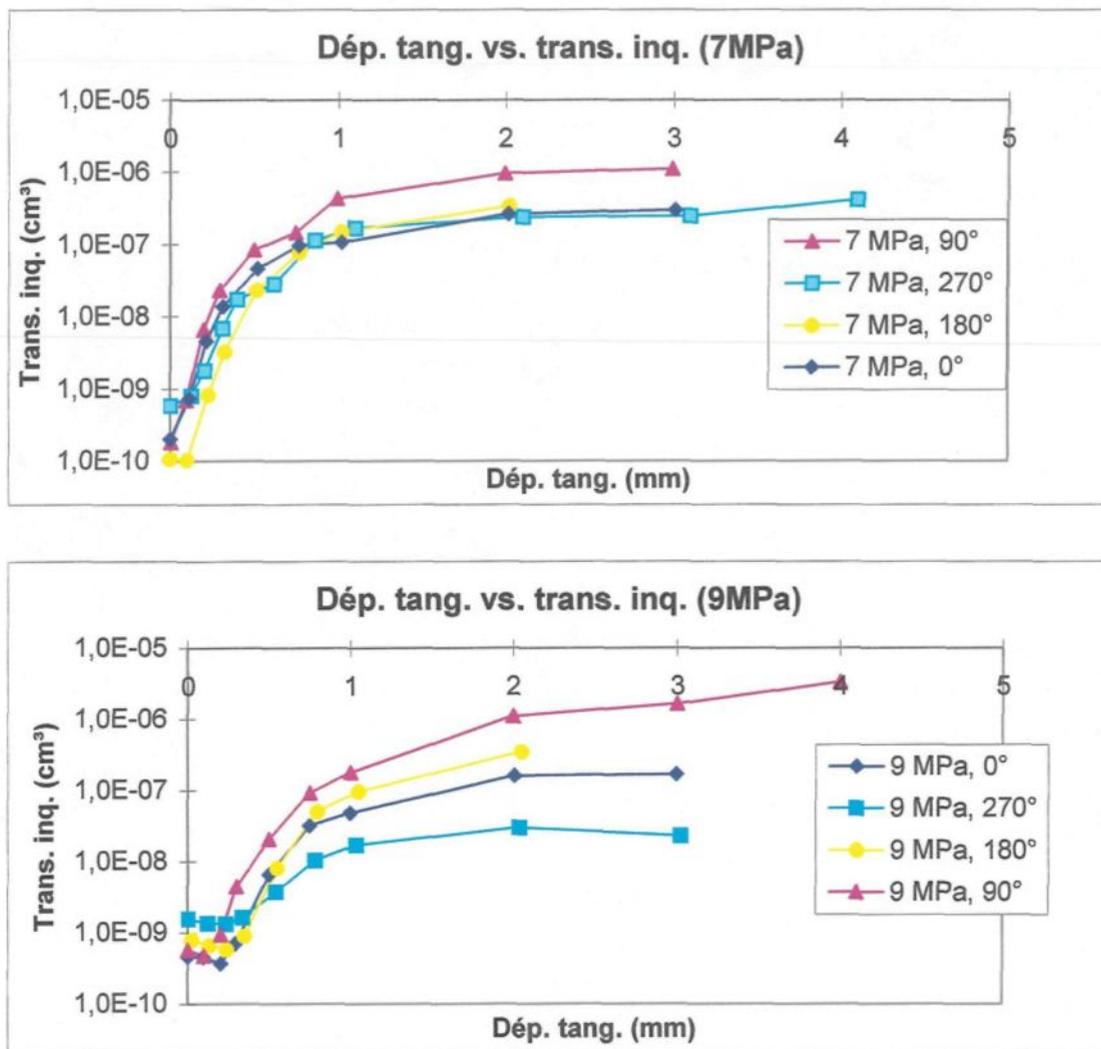


Figure 6.22: Transmissivité intrinsèque en fonction du déplacement tangential pour les niveaux de contrainte normale de 7 et 9 MPa.

Le bilan des observations reliées aux différents paliers de contrainte normale, indique que la transmissivité intrinsèque a un comportement isotrope dans les différentes directions de cisaillement mais tend à se différencier avec l'augmentation de la contrainte normale (développement d'une anisotropie en fonction de l'augmentation de la contrainte normale).

La direction 90° est celle qui montre la plus forte transmissivité intrinsèque, constatation qui a aussi été noté lors des essais de la première phase (1995). La direction 270° est par contre celle qui montre la plus faible transmissivité intrinsèque. Les deux autres directions de cisaillement montrent des transmissivités intrinsèques intermédiaires.

En conclusion de ces essais, on doit constater qu'à la dilatance la plus élevée ne correspond pas nécessairement la transmissivité intrinsèque la plus élevée. Ce comportement peut s'expliquer par le schéma simple présenté à la figure 6.23 fabriqué à partir de la morphologie de la surface de la fracture. La surface de notre fracture (chapitre 4) montre une structure de grande dimension (pente ascendante croissante parallèle à la direction 270°) avec des structures emboîtées de plus petites dimensions. Le cisaillement imposé selon cette pente ascendante dans la direction 270° génèrent beaucoup moins de vides que le cisaillement selon la direction opposée (pente descendante). De plus ce phénomène s'amplifie avec l'augmentation de la contrainte normale et la dégradation des aspérités (plus grande contrainte locale sur les facettes positives d'aspérités lors d'un cisaillement de deux surfaces montrant une pente ascendante).

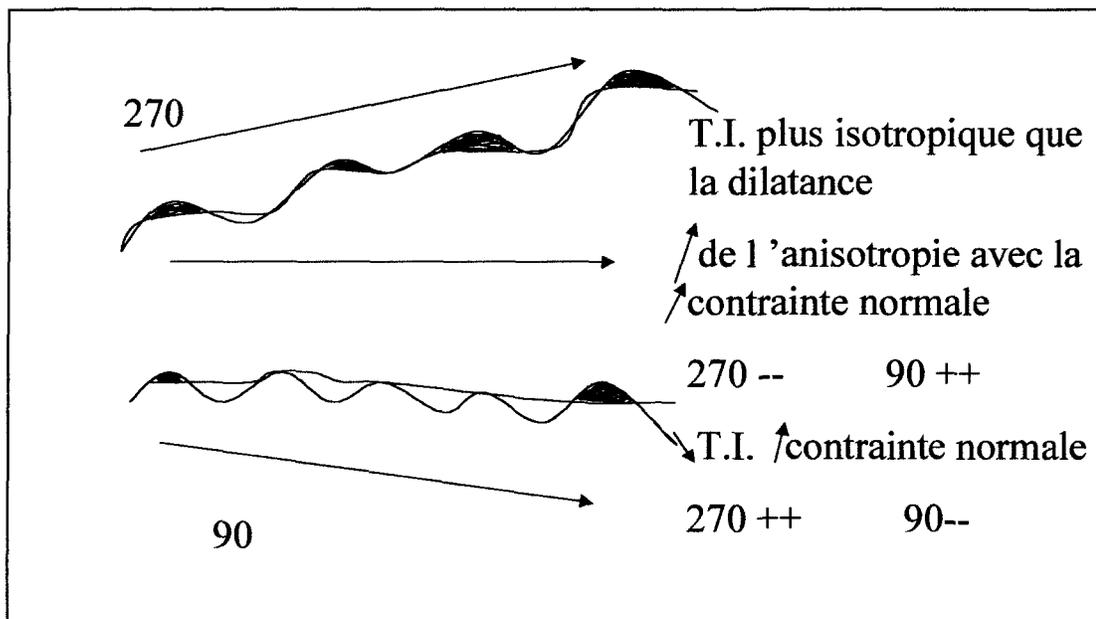


Figure 6.23 : Schéma montrant un cisaillement imposé le long d'une pente ascendante et descendante.

L'examen des courbes de transmissivité intrinsèque (injection à 1 l/h) en fonction des directions de cisaillement (figure 6.24), montre que, peu importe la direction de cisaillement, l'augmentation de la contrainte normale se fait sentir dans la phase de mobilisation de dilatance. À partir de la phase de ramollissement des aspérités, on remarque que l'augmentation de la contrainte normale engendre peu de différences pour les directions de cisaillement 180° et 90°. Pour les deux autres directions (0° et 270°), on remarque une amplification de la transmissivité intrinsèque avec l'augmentation de la contrainte normale.

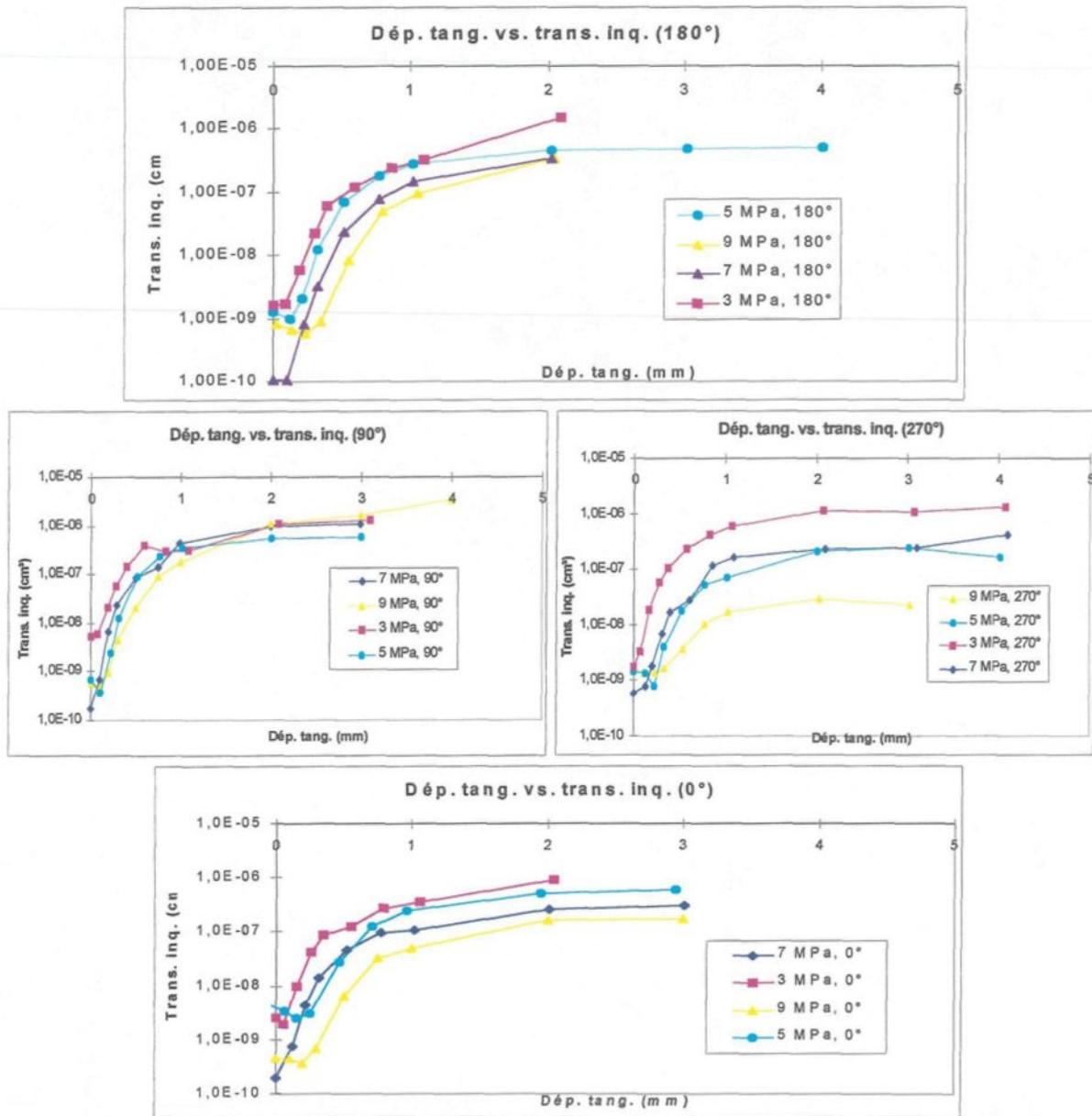


Figure 6.24: Courbes de la transmissivité intrinsèque pour les différentes directions de cisaillement à un débit de 1 l/h.

4.3.4 Courbes de transmissivité intrinsèque en fonction des différents débits

L'accroissement du déplacement tangentiel entraîne un écart de plus en plus marqué entre les courbes des transmissivités intrinsèques des petits débits de 0.25 et 1 l/h (figure 6.25). Cet écart entre les débits (0.25, 1 l/h et 4, 8 l/h) apparaît juste après le pic de résistance au cisaillement quand la progression ou croissance de la transmissivité intrinsèque commence à s'atténuer. Généralement, la transmissivité intrinsèque augmente avec le débit d'injection (figure 6.25 et annexe 10) et l'écart entre les différents débits diminue graduellement avec l'augmentation de la contrainte normale de 3 à 9 MPa (figure 6.25). On peut expliquer ce phénomène, pour les faibles débits ou lorsque la contrainte normale est faible, par l'incapacité de former une pression suffisante dans la fracture. C'est-à-dire que l'ouverture de la fracture est trop grande pour former une pression significative par rapport au débit injecté. La figure 6.26 résume ces propos en montrant la perte du rapport de proportionnalité Q/P (débit/pression) en fonction de certains débits trop faibles.

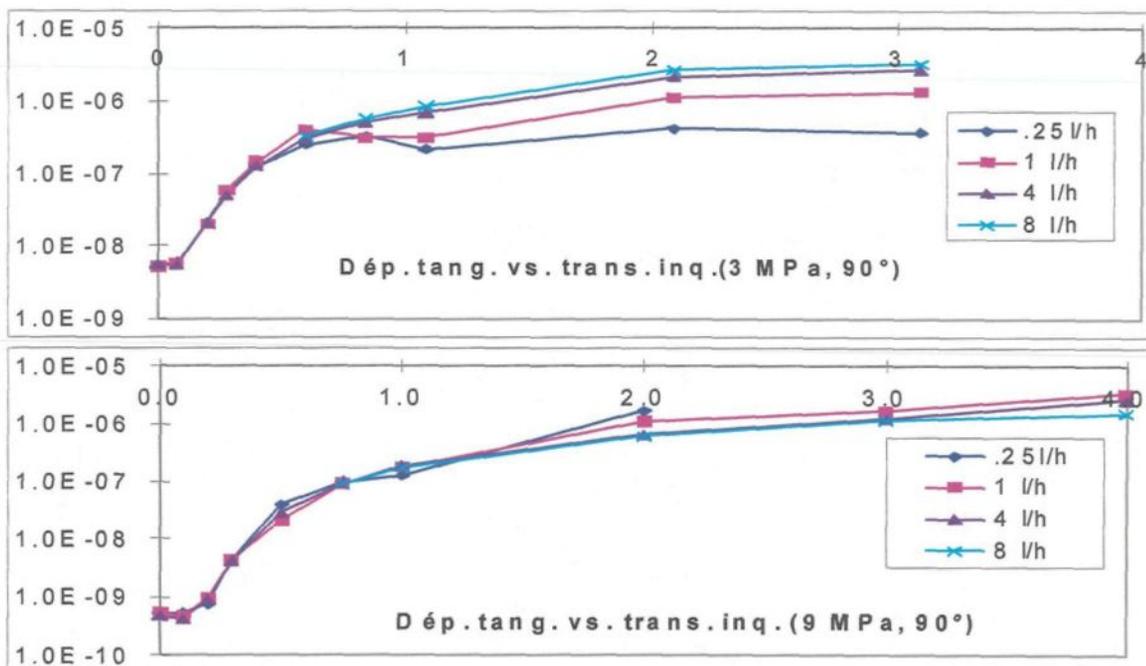


Figure 6.25: Comportement de la transmissivité intrinsèque en fonction des débits et de la contrainte normale.

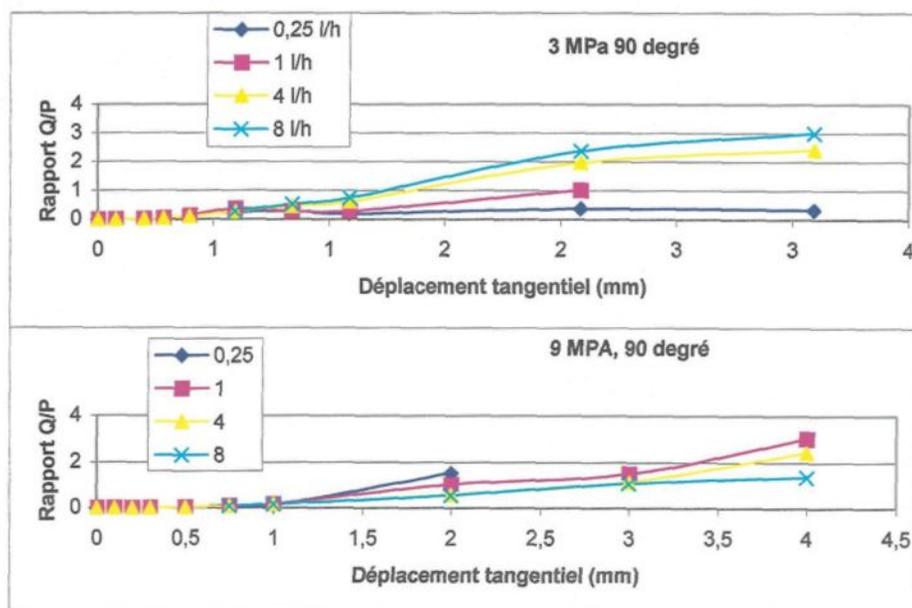


Figure 6.26: Exemple du rapport Q/P en fonction du déplacement tangentiel.

6.4 Analyse directionnelle de l'écoulement

Dans cette section, après une analyse globale des patrons de récupération de l'écoulement, une analyse sera faite de l'anisotropie de l'écoulement en position initiale; puis l'analyse portera sur les principales phases du comportement mécanique en cisaillement de la fracture; dans un troisième temps, la récupération directionnelle de l'écoulement sera examiné par rapport à l'effet de basculement; dans un quatrième temps, l'examen porte sur la récupération directionnelle de l'écoulement par rapport aux différentes directions de cisaillement; et finalement, une analyse sera faite des principaux points de cette analyse directionnelle de l'écoulement. Il est à noter que l'analyse des essais de la deuxième phase se fera par groupement d'essais et non pas essai par essai comme ceux de la première phase (Gentier et al., 1997).

6.4.1 Analyse générale des patrons de récupérations

L'examen du comportement général des patrons de récupération par secteur des différents essais (annexe 10), permet de noter de nombreuses similitudes. La plupart des patrons débutent (0 mm) en présentant une récupération totale se concentrant dans un ou deux secteurs (figure 6.27 et annexe 10). Puis, avec le début du déplacement en cisaillement, on remarque une forte variation dans la récupération entre les secteurs (augmentation et diminution brusques des secteurs de récupération (figure 6.27). Ce début de variation dans la récupération sectorielle est retardé de quelques dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel avec l'accroissement du niveau de contrainte normale. Cette forte variation brusque entre les secteurs se poursuit au-delà du déplacement au pic de

résistance au cisaillement. Après le pic de résistance, on remarque une stabilisation graduelle de la récupération dans certains secteurs. Cette stabilisation dans la variation de la récupération des secteurs débute à environ 0.75 mm de déplacement tangentiel pour se terminer par une stabilisation plus complète de 1 à 1.5 mm de déplacement tangentiel (figure 6.27 et annexe 10). Pour quelques essais à faibles débits (0.25 l/h et 1 l/h) la stabilisation de la récupération dans les secteurs se produit plus difficilement.

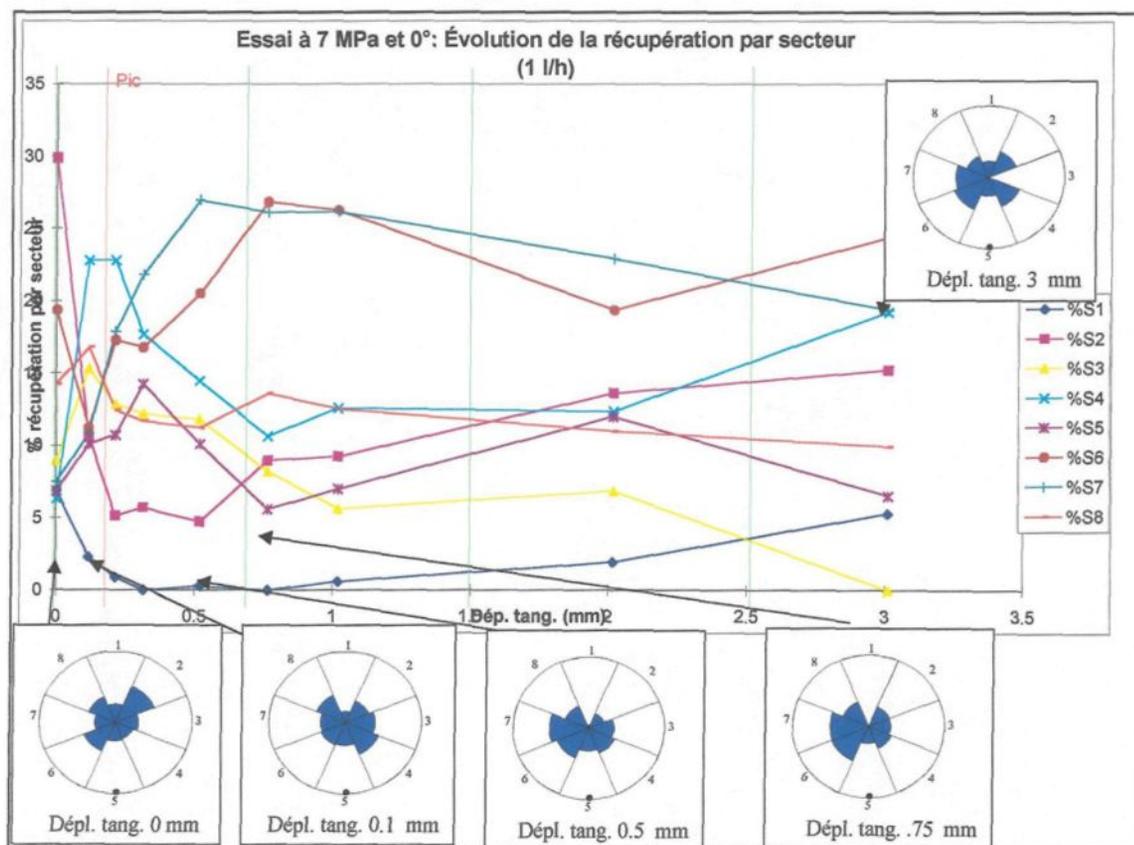


Figure 6.27: Évolution de la récupération par secteur

6.4.2 Analyse directionnelle de l'écoulement en position initiale

Pour commencer l'analyse de l'écoulement directionnelle, nous avons ramené tous les patrons initiaux de récupération de l'écoulement à la direction 0° de cisaillement. La figure

6.28 montre tous les patrons de récupérations en pourcentage ramené à la direction 0° , pour un même débit de 1 l/h, en fonction des huit secteurs de récupération. Nous remarquons une grande dispersion des patrons selon les différents secteurs. Étant donné l'ouverture et la configuration des contacts différent(e)s en fonctions de la contrainte normale, nous avons séparé les patrons aux figures 6.29, 6.30, 6.31 et 6.32 par niveau de contrainte normale. Une fois de plus ces figures montrent une bonne dispersion des patrons selon les différents secteurs.

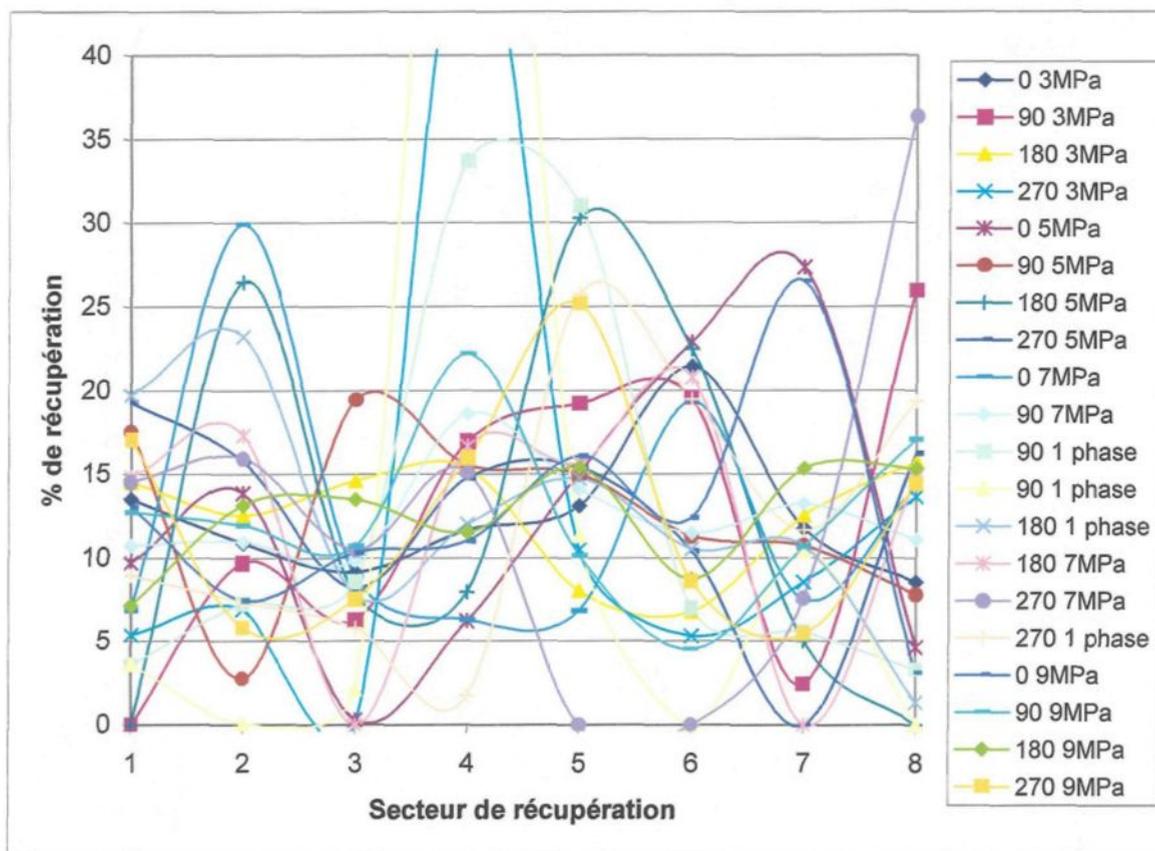


Figure 6.28: Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° .

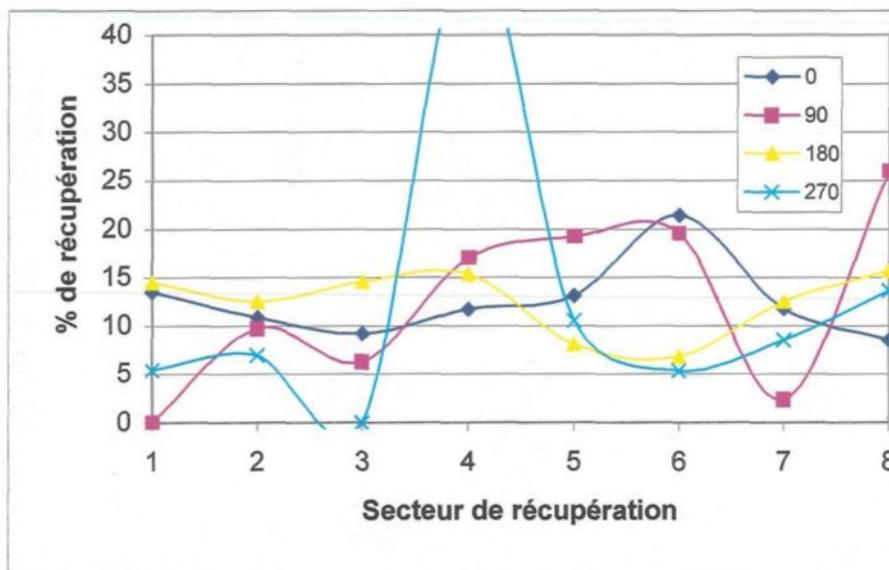


Figure 6.29: Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 3 MPa.

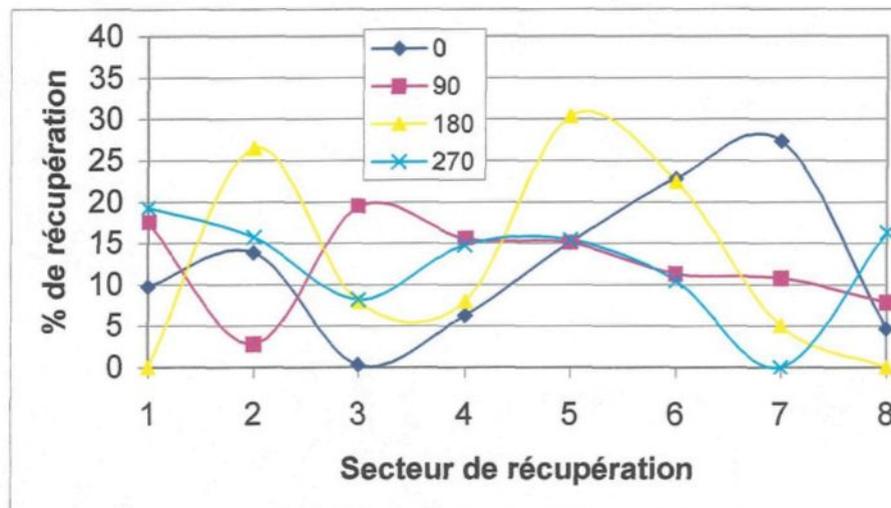


Figure 6.30: Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 5 MPa.

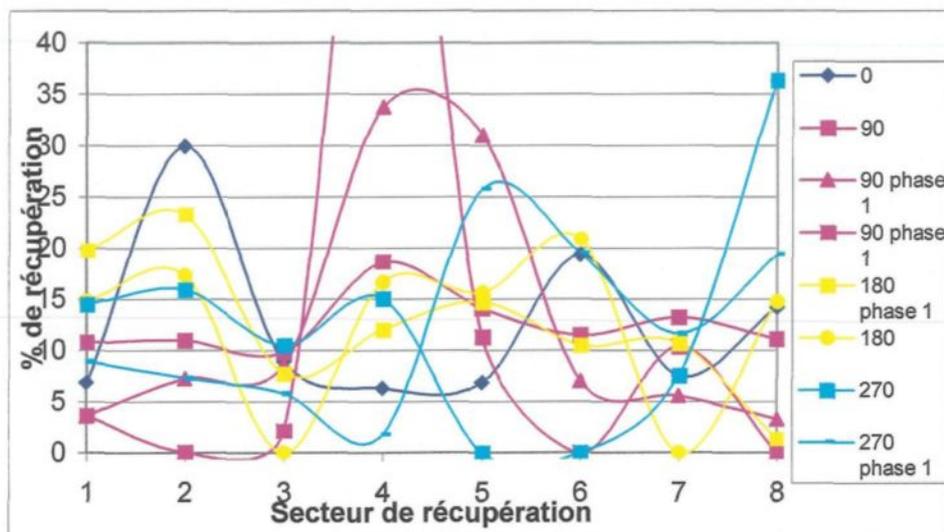


Figure 6.31: Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 7 MPa.

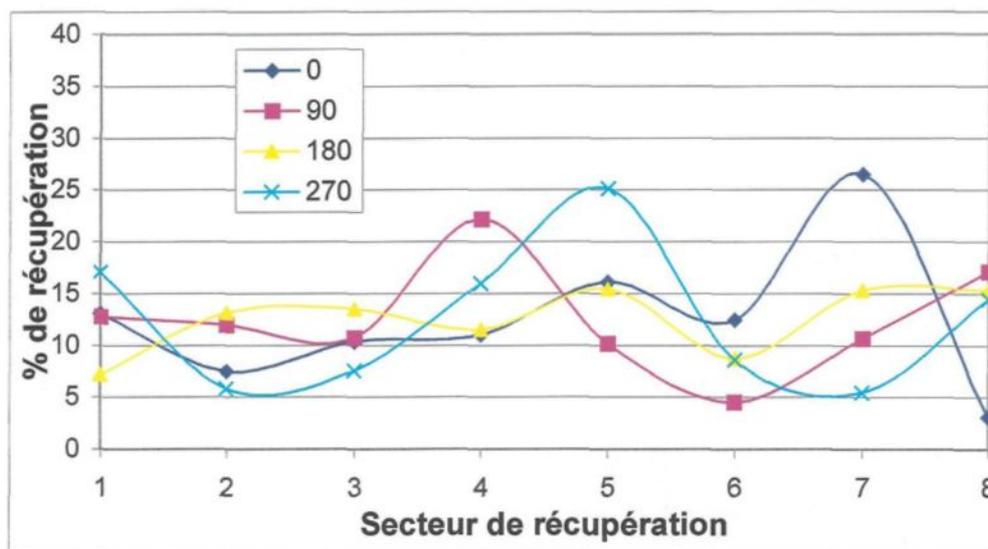


Figure 6.32: Patrons de récupération directionnelle ramenés à la direction 0° pour le niveau de contrainte normale de 9 MPa.

Suite à cela, nous avons positionné sur la figure 4.33 les patrons de récupération de l'écoulement initiaux des deux phases (1995 et 1996) avec des configurations (direction de cisaillement et contrainte normale) identiques. Nous observons une forte diminution de la dispersion malgré le fait, comme montré précédemment, que la mise en place différente entre ces deux phases jouent un rôle important. Une explication à la forte dispersion serait la problématique soulevée dans la partie mécanique quant au positionnement plus refermé de la fracture, peu importe la direction de cisaillement, vers l'avant de la machine de cisaillement (mesuré à l'aide d'un jeu de cale identique en début d'essai). Une autre explication pourrait être reliée au collage du système de captage mais cela reste plus improbable étant donné la similitude entre des patrons de récupération de l'écoulement obtenu à partir de collages sur deux années différentes.

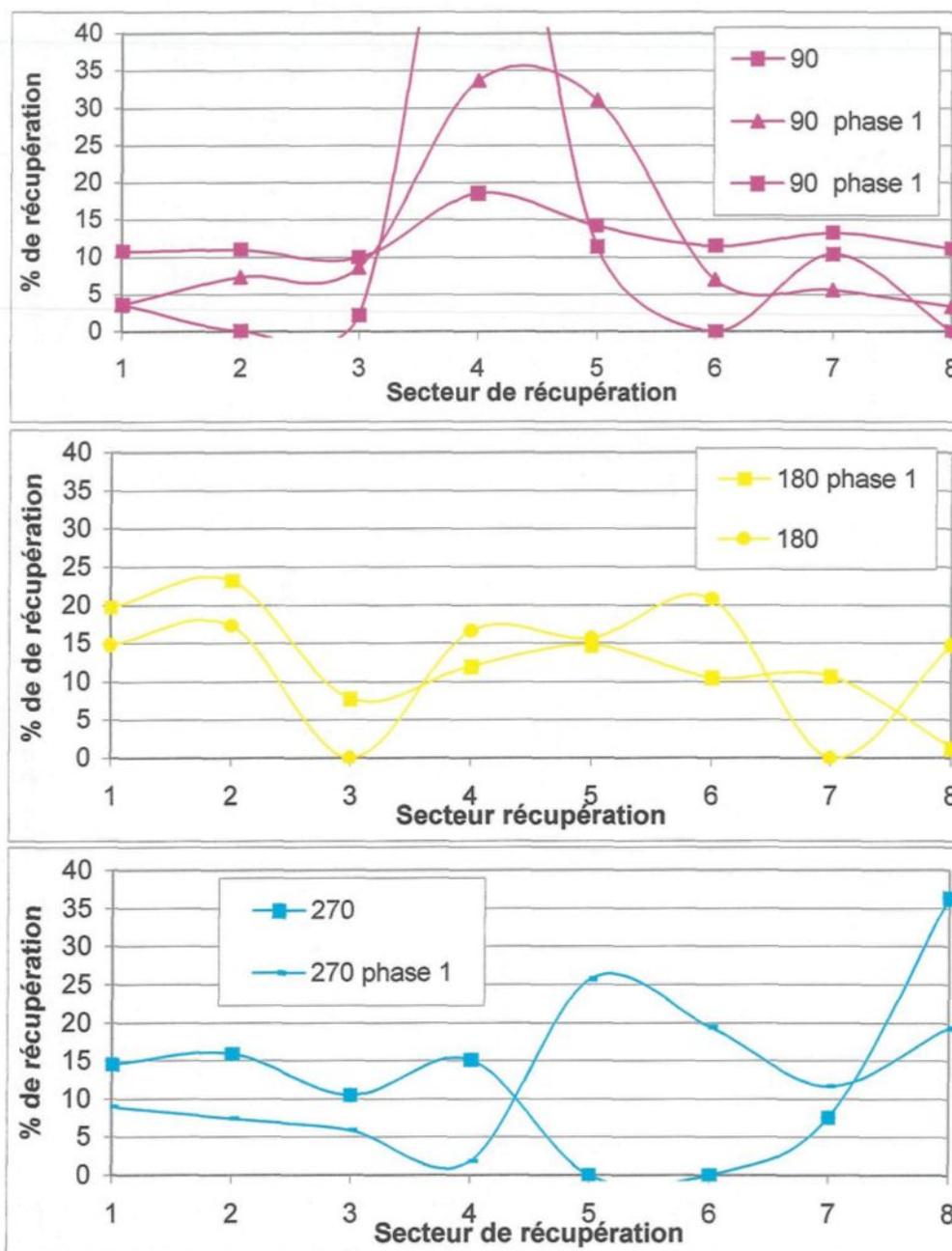


Figure 6.33: Patrons de récupération de l'écoulement initiaux des deux phases (1995 et 1996) avec des configurations (direction de cisaillement et contrainte normale) identiques.

6.4.3 Récupération directionnelle en fonction des différentes phases mécaniques

La récupération directionnelle de l'écoulement a été analysée en fonction des différentes phases mécaniques. La figure 6.34 montre la situation initiale de l'ensemble des patrons de récupération de l'écoulement aux différents paliers de contraintes normales et pour les différentes directions de cisaillement. Une dispersion importante est notée. Les résultats pour la mobilisation du frottement et au pic produisent de fortes dispersions. Par contre pour la phase du frottement résiduel (figure 6.35), les patrons de récupération de l'écoulement montrent beaucoup moins de dispersion. On note aussi pour ce segment une meilleure similitude entre les patrons de récupération pour les directions de cisaillement 270° et 90°.

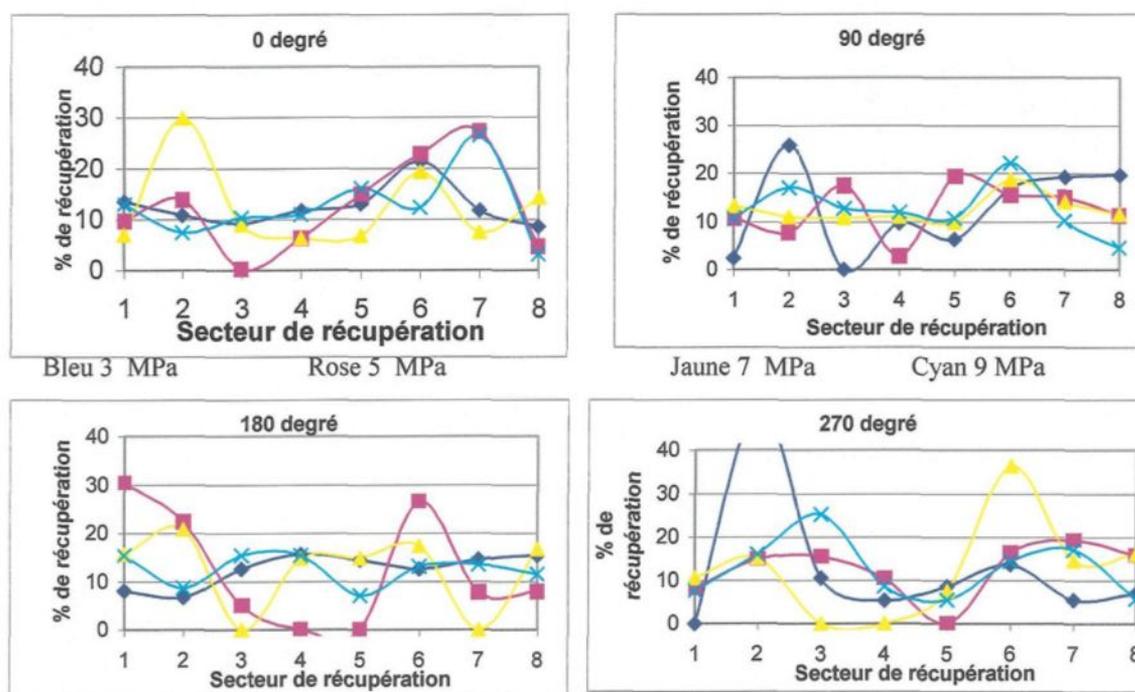


Figure 6.34: Patrons de récupération directionnelle en début d'essai par direction de cisaillement.

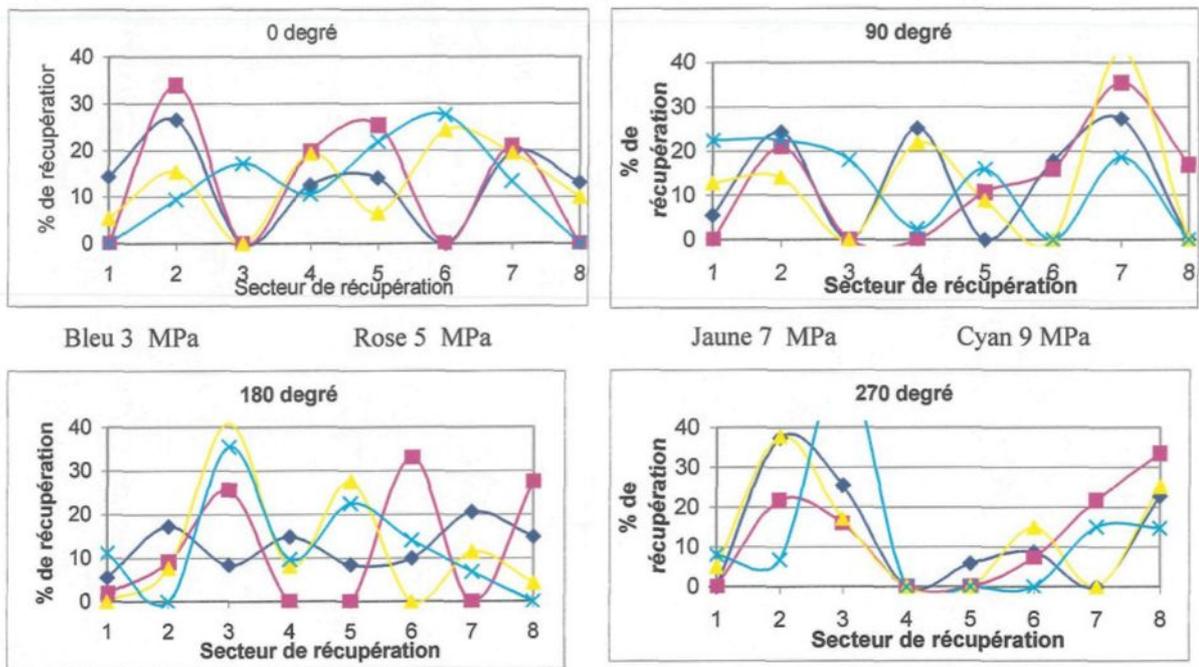


Figure 6.35: Patterns de récupération directionnelle au frottement résiduel par direction de cisaillement.

6.4.4 Récupération directionnelle versus basculement

Nous avons regardé pour les secteurs 1 (avant de la machine de cisaillement) et 5 (arrière de la machine de cisaillement) l'effet de basculement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement par rapport à la récupération directionnelle de l'écoulement pour les différentes directions de cisaillement et les différents niveaux de contrainte normale.

Les figures 6.36 à 6.39 montrent respectivement pour les directions de cisaillement 0° , 90° , 180° et 270° la récupération directionnelle de l'écoulement dans les secteurs 1 et 5 en fonction du déplacement tangentiel. On y note la chute de récupération du secteur 1 dans les directions de cisaillement 0° et 270° . Dans les deux autres directions aucune tendance ne peut être observée. La récupération dans le secteur 5 montre de fortes variations dans les directions 90° et 180° . Comme démontré précédemment, l'effet de basculement semble plutôt dicté par la morphologie de la surface de la fracture que par l'appareillage expérimental.

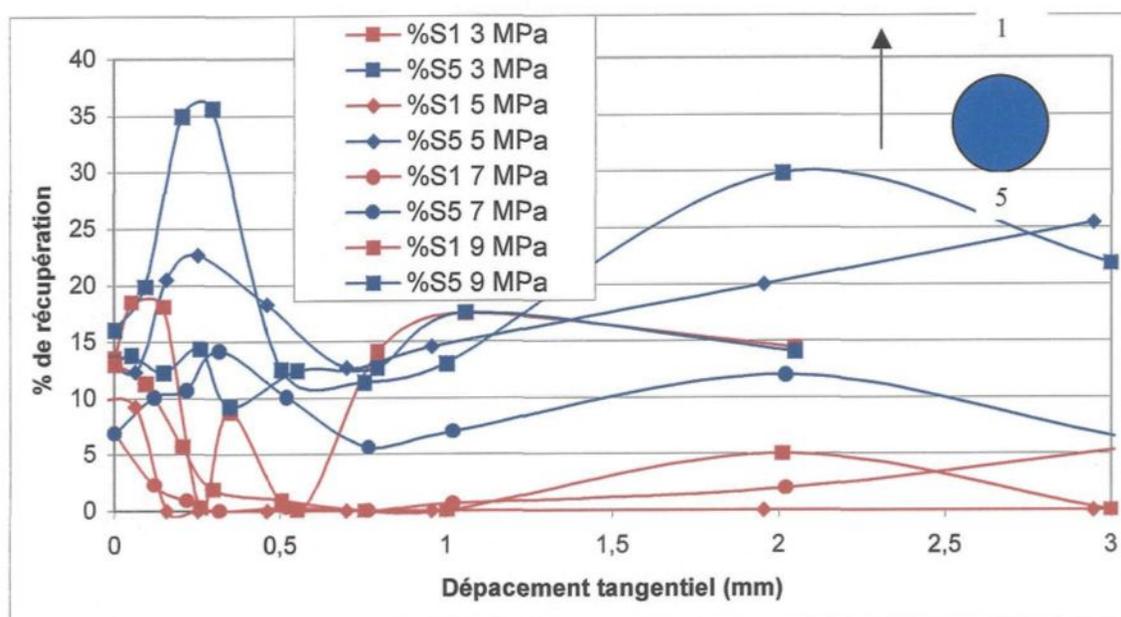


Figure 6.36: Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 0° .

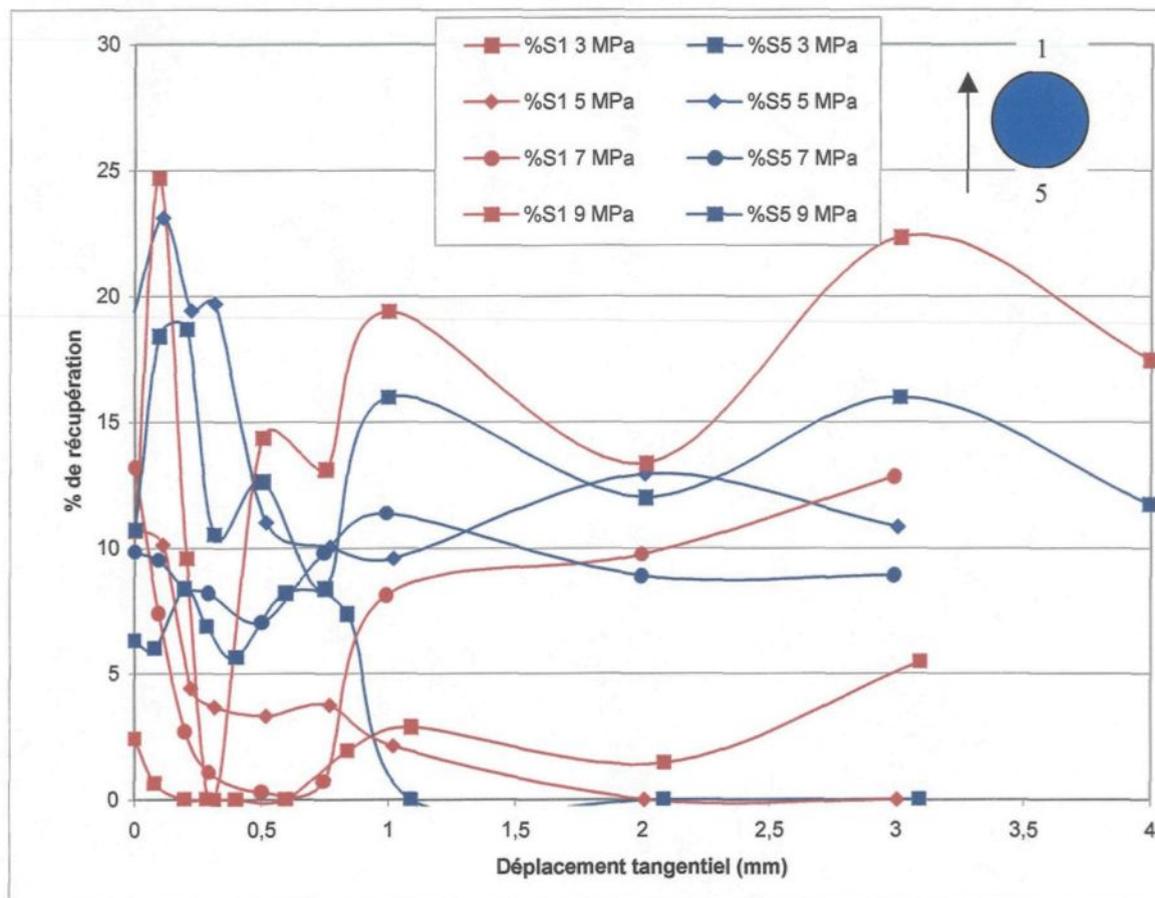


Figure 6.37: Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 90°.

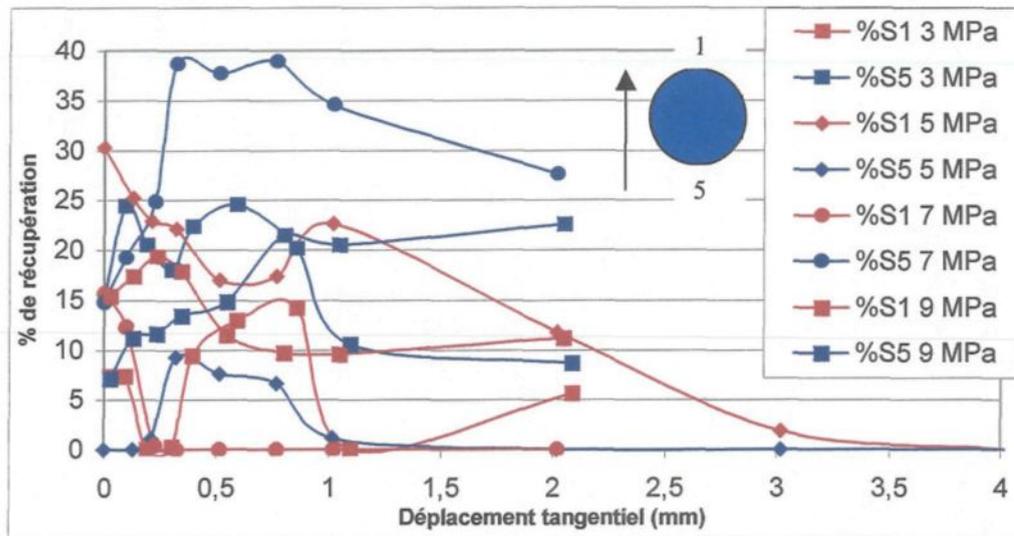


Figure 6.38: Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 180°.

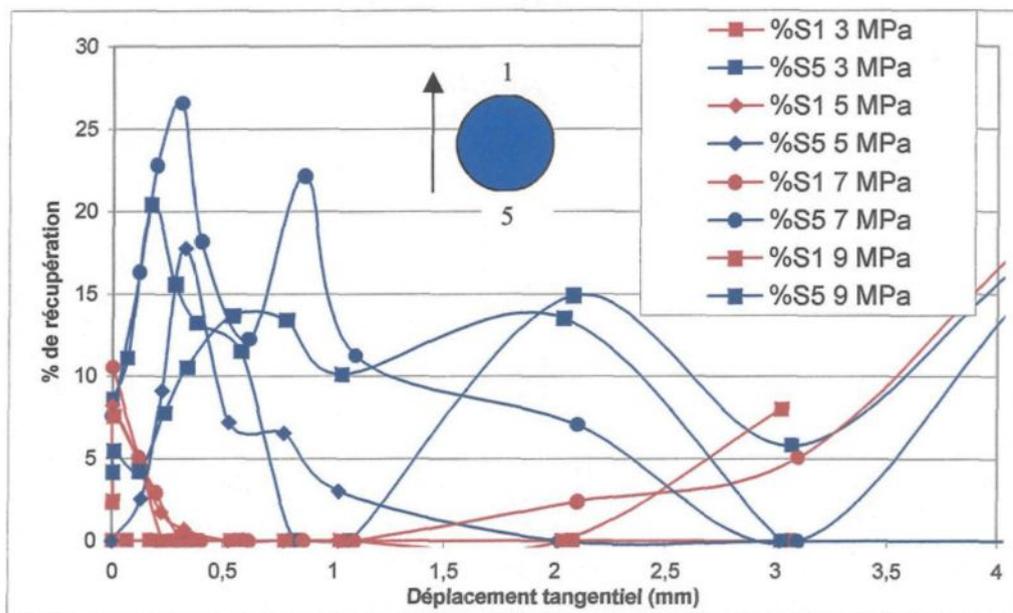


Figure 6.39: Patrons de récupération directionnelle pour les secteurs 1 et 5 aux différents niveaux de contrainte normale pour la direction 270°.

6.4.5 Analyse de la récupération directionnelle de l'écoulement en fonction de la direction de cisaillement

L'examen de la variation de la récupération par secteur en fonction des différentes directions de cisaillement est effectué pour un déplacement tangentiel de 2 mm parce qu'il a l'avantage d'être présent dans tous les essais et se situe dans la phase mécanique de stabilisation. Les figures 6.40 à 6.43, présentent respectivement pour les paliers de 3, 5, 7 et 9 MPa les rosettes des pourcentages de récupération par secteur. Pour le palier 3 MPa, (figure 6.40), on remarque que les directions de cisaillement opposées 90° - 270° présentent des patrons de récupération de l'écoulement dans les rosettes selon des secteurs perpendiculaires à la direction de cisaillement. Les directions opposées 0° - 180° démontrent une moins grande anisotropie d'écoulement pour ce palier de contrainte normale. On remarque pour ce niveau de contrainte normale et les autres niveaux que l'anisotropie d'écoulement est de plus en plus nette avec l'augmentation du débit. La figure 6.41 montre les patrons de récupération des rosettes pour le palier de contrainte normale de 5 MPa. A part la direction 0° plus diffuse, les autres directions montrent des patrons de récupération de l'écoulement perpendiculaires à la direction de cisaillement.. Aux paliers de contrainte normale de 7 et 9 MPa (figure 6.42 et 6.43), on peut observer, pour les quatre directions, des patrons de récupération de l'écoulement perpendiculaires à la direction de cisaillement.

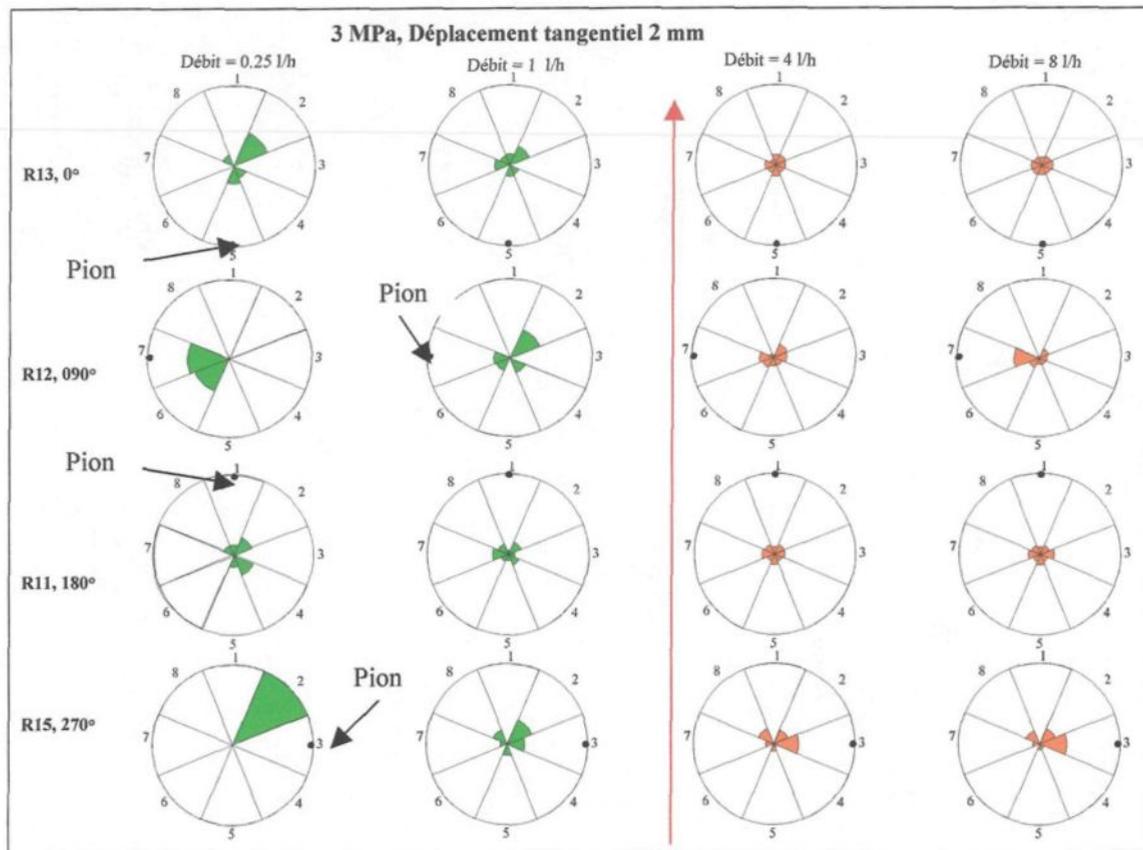


Figure 6.40: Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 3 MPa au déplacement tangentiel de 2 mm. La flèche rouge indique de le sens de déplacement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement. Le repère (pion) montre la rotation de la fracture à l'intérieur de la machine de cisaillement (0° , 90° , 180° , 270°).

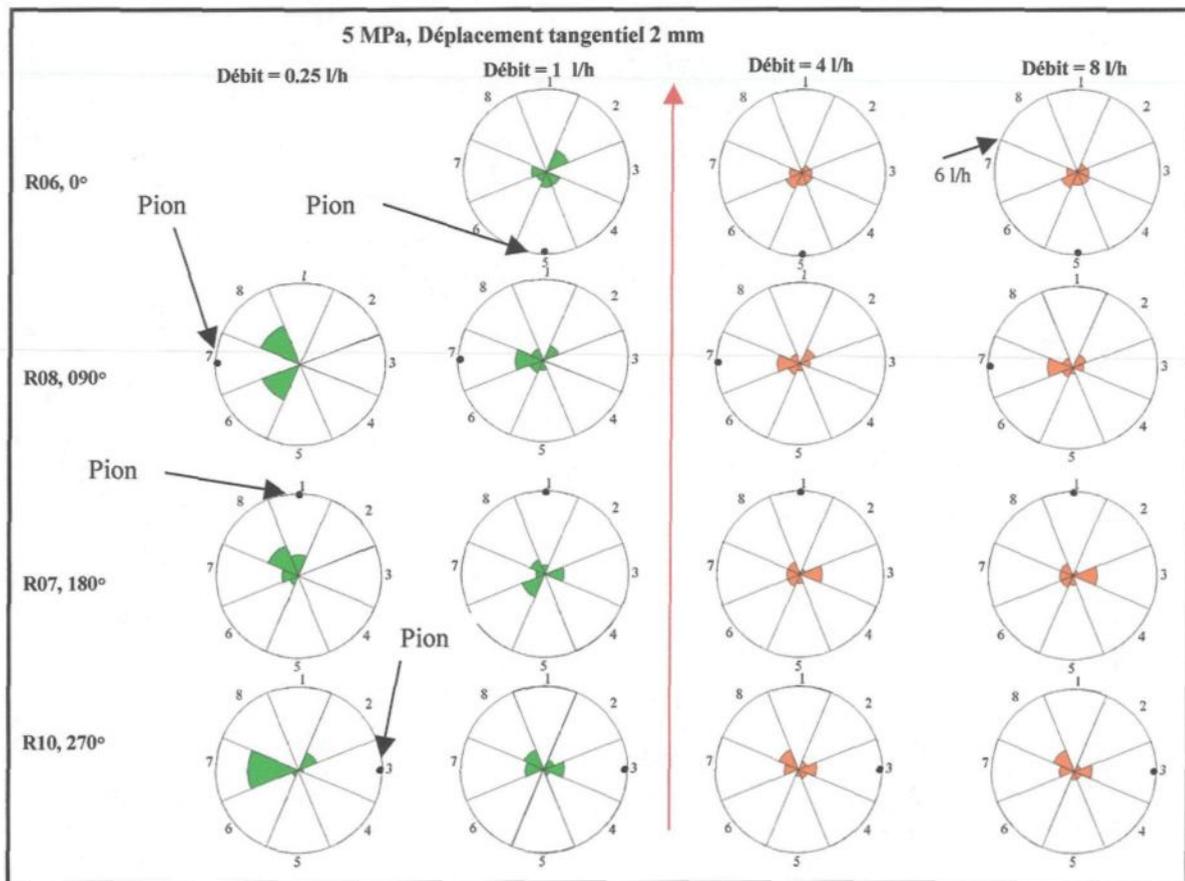


Figure 6.41: Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 5 MPa au déplacement tangentiel de 2 mm. La flèche rouge indique de le sens de déplacement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement. Le repère (pion) montre la rotation de la fracture à l'intérieur de la machine de cisaillement (0°, 90°, 180°, 270°).

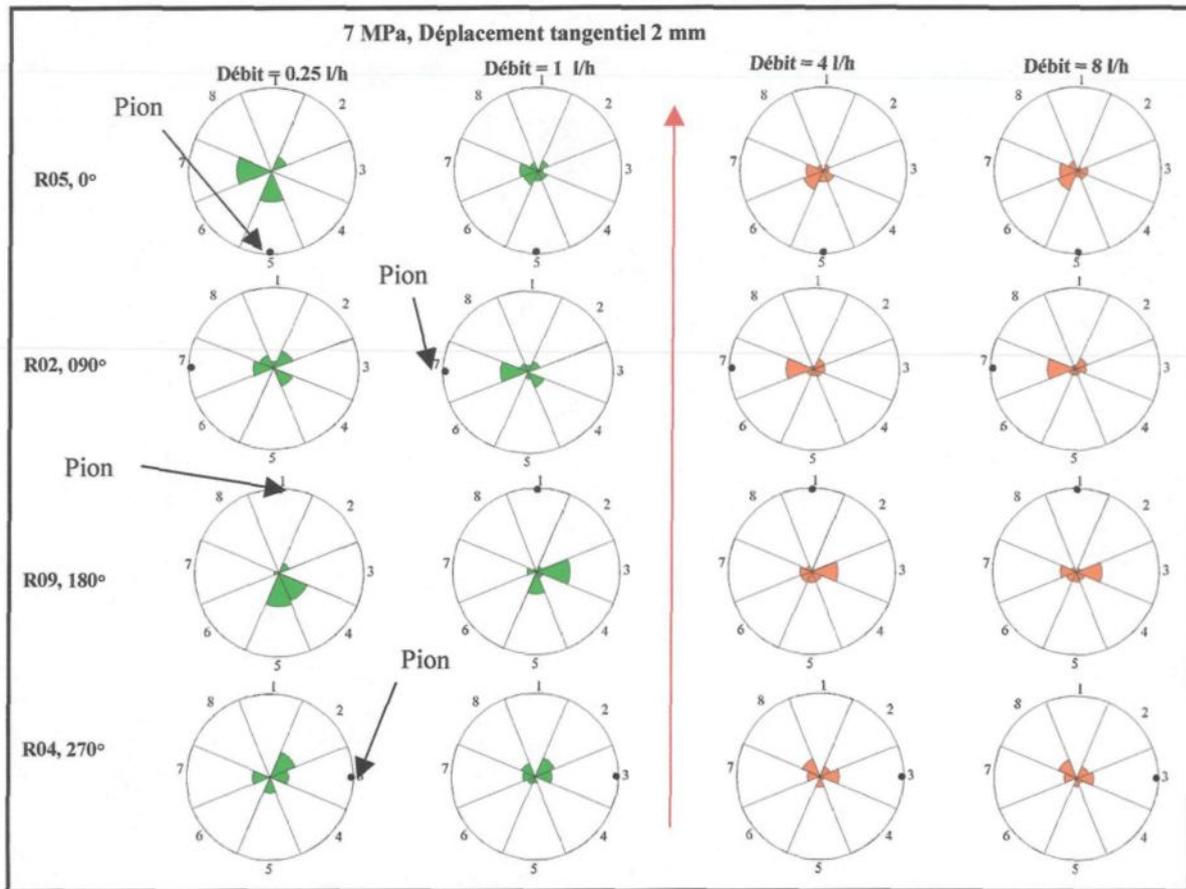


Figure 6.42: Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 7 MPa au déplacement tangentiel de 2 mm. La flèche rouge indique de le sens de déplacement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement. Le repère (pion) montre la rotation de la fracture à l'intérieur de la machine de cisaillement ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$).

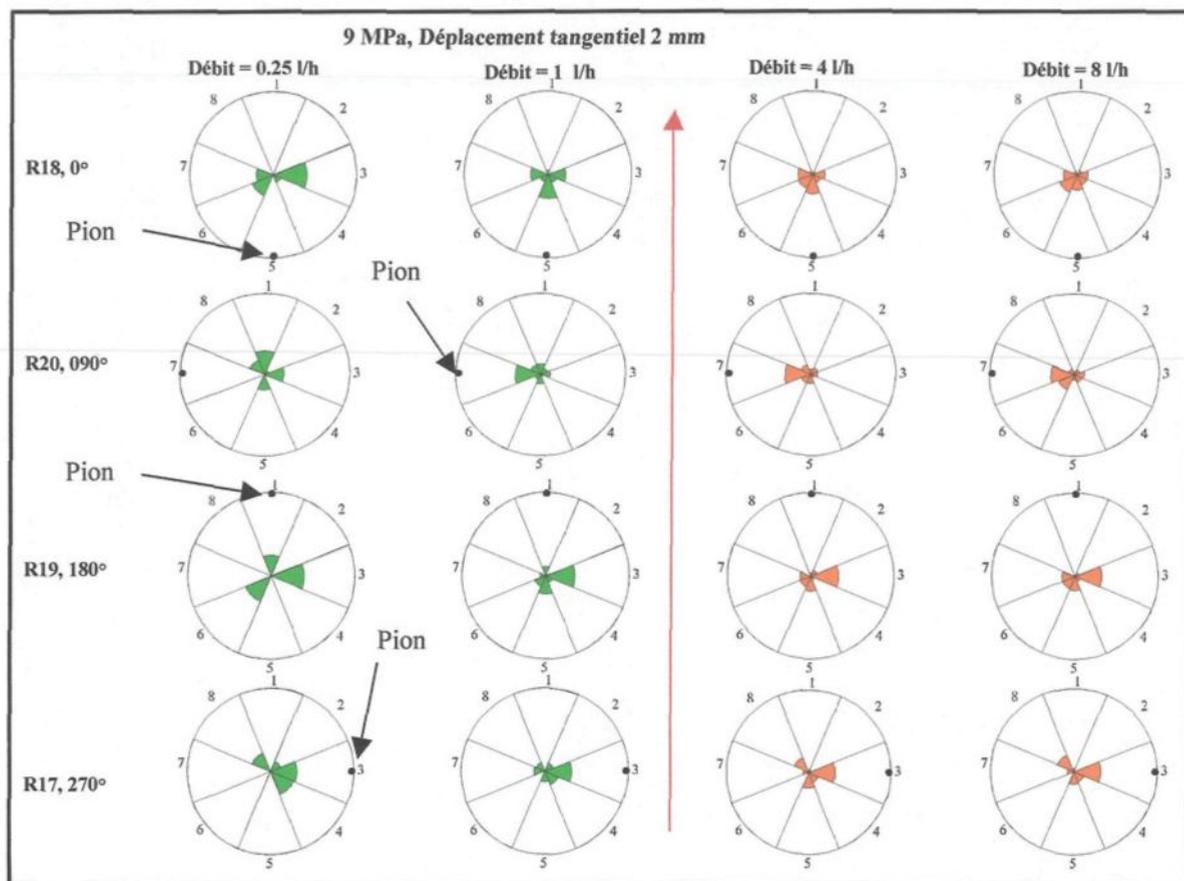


Figure 6.43: Vue en plan de l'éponte inférieure montrant la récupération directionnelle de l'écoulement (représentation en rosette) pour le palier de contrainte normale de 9 MPa au déplacement tangentiel de 2 mm. La flèche rouge indique de le sens de déplacement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement. Le repère (pion) montre la rotation de la fracture à l'intérieur de la machine de cisaillement (0°, 90°, 180°, 270°).

6.4.6 Résumé des observations

Les principaux points qui ressortent de cette analyse sont:

- La similarité de comportement entre les courbes de transmissivité intrinsèque et les patrons des pourcentages de récupération de l'écoulement par secteur.
- La diminution de la dispersion des patrons de récupération directionnelle de l'écoulement à la phase de frottement résiduel.
- Au départ la récupération directionnelle de l'écoulement ramenée à la direction de cisaillement 0° montre une forte dispersion pour l'ensemble des essais. En comparant des essais entre les phases de 1995 et 1996 nous observons une forte diminution de la dispersion malgré le fait, comme montré précédemment, que la mise en place différente entre ces deux phases jouent un rôle important.
- À partir de l'analyse des patrons de récupération directionnelle de l'écoulement, l'effet de basculement semble plutôt dicté par la morphologie de la surface de la fracture que par l'appareillage expérimental lui-même.
- À la phase de frottement résiduel (déplacement tangentiel de 2 mm), on note que l'écoulement dans la fracture se fait majoritairement dans une direction perpendiculaire à la direction de cisaillement.
- Les essais, pour une même direction de cisaillement, démontrent des anisotropies d'écoulement plus nettes avec l'augmentation du débit.

6.5 Discussion

Les patrons de récupération initiaux (avant cisaillement) démontrent des variations d'un essai à l'autre. La même remarque a été faite lors de la discussion (ou analyse) de la première phase (Gentier et al., 1997). Cette remarque avait conduit à poser le problème du calage initial de l'échantillon dans les deux demi-boîtes de la machine de cisaillement, du remboîtement initial de la fracture et de l'influence du dispositif de récupération sur le patron de récupération initial. Lors de cette deuxième phase, un correctif a été apporté en effectuant une mise en place de l'échantillon avant les essais. Cette procédure n'a pas entraîné de changement notable sur le comportement des patrons initiaux. Cependant, pour un débit de 1 l/h, les patrons initiaux et ceux à 2 mm de déplacements tangentiels, pour une même direction de cisaillement (annexe 10), permettent d'observer que malgré la variation des patrons de récupération initiaux, les patrons de récupération au déplacement tangentiel à 2 mm démontrent quand même une régularité du comportement. De plus, on remarque que les patrons de récupération initiaux démontrent un comportement moins variable avec l'augmentation du débit.

L'évolution de l'anisotropie de l'écoulement du fluide en fonction de la direction de cisaillement et du déplacement tangentiel est décrit beaucoup plus simplement en comparant le comportement des patrons de récupération par rapport à la courbe de transmissivité intrinsèque au lieu de le comparer aux différentes phases mécaniques (surtout la courbe de dilatance).

- La phase stable avant la croissance rapide de la transmissivité intrinsèque (pas toujours présente pour les faibles contraintes normales) démontre une correspondance des patrons de récupération dans les premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel. Cette phase peut s'expliquer par un volume des vides restreint très peu variable. Mécaniquement, cette phase correspond à la mobilisation du frottement.
- La deuxième phase correspond à la mobilisation de la transmissivité intrinsèque (pente forte). Dans cette phase, on remarque des changements brusques dans la récupération entre les différents secteurs. Cette deuxième phase peut s'expliquer par l'existence d'un volume des vides initial restreint pour l'écoulement qui en proportion va augmenter de façon considérable pour un faible déplacement tangentiel. A cette variation de volume, s'ajoute une modification rapide de la connectivité des chenaux de circulation. Il est probable que l'écoulement se fera par de nombreux petits chenaux entre les nombreux points de contact de la fracture. Un tout petit déplacement tangentiel ou un changement du débit peut entraîner des modifications majeures dans le patron de récupération. Du point de vue mécanique, cette phase correspond à la mobilisation de la dilatance.
- La troisième phase est la décroissance du taux d'accroissement de la transmissivité intrinsèque correspondant à une stabilisation graduelle des récupérations par secteur. C'est dans cette phase qu'il est plus approprié d'utiliser la courbe de transmissivité intrinsèque, car la courbe de dilatance démontre un taux maximum (pente maximum) lorsque survient la décroissance graduelle du taux d'accroissement de la transmissivité intrinsèque et la stabilisation graduelle dans les secteurs de récupération. Cette

troisième phase est probablement le résultat, après le pic de cisaillement, du développement graduel de chenaux plus importants, perpendiculairement à la direction de cisaillement et correspondant à la destruction des petites aspérités.

- La quatrième et dernière phase correspond à la stabilisation de la transmissivité intrinsèque et de l'écoulement dans les secteurs de récupération. Elle correspond mécaniquement à la phase de ramollissement qui suit le pic de résistance au cisaillement. Durant cette phase, la fracture s'ouvre encore légèrement, mais la quantité de matériel broyé augmente, entraînant une stabilisation de la transmissivité intrinsèque. L'écoulement se fait plus facilement par de grands chenaux qui contournent des zones de contacts broyés perpendiculairement à la direction de cisaillement. Dans ce domaine des déplacements tangentiels, le patron de récupération correspondant à un débit faible diffère de celui correspondant à un débit élevé à cause de la mise en suspension de matériel de broyage dans l'écoulement. Les chenaux peuvent se colmater ou inversement se décolmater avec ce matériel de broyage et entraîner ainsi la fluctuation du débit. La comparaison des différents essais dans les mêmes directions de cisaillement montre bien que les faibles débits se comportent plutôt aléatoirement alors que les débits plus élevés démontrent clairement des anisotropies d'écoulement perpendiculaires à la direction de cisaillement. Pour les essais à 3 MPa de contrainte normale, l'anisotropie de l'écoulement perpendiculairement au cisaillement se développe plutôt faiblement dans les directions opposées 0° et 180° . Cela pourrait s'expliquer probablement par la morphologie de la surface de la fracture selon cette

orientation (0° et 180° ; orientation parallèle à la structure majeure de la surface de la fracture), par une plus faible dégradation des aspérités à ce niveau de contrainte normale et par une plus forte dilatance.

6.6 Conclusion

L'analyse de ce programme d'essais a permis de faire ressortir de façon claire et précise le comportement hydraulique anisotrope d'une fracture en cisaillement. La première phase avait suggéré des pistes de solutions ainsi que des modifications expérimentales à réaliser pour atteindre les résultats attendus et a permis d'effectuer les modifications appropriées aux essais de la deuxième phase. L'injection à plus fort débit a permis de faire ressortir l'anisotropie d'écoulement en fonction des directions de cisaillement. Cette anisotropie d'écoulement se produit à partir du pic de résistance au cisaillement et du début de la dégradation des aspérités perpendiculairement à la direction de cisaillement. Dépendamment de la morphologie de la surface de la fracture, l'anisotropie se développe préférentiellement d'un côté ou d'un autre de la direction perpendiculaire au cisaillement.

Donc, peu importe si une fracture montre une anisotropie de sa morphologie de surface, l'écoulement sera favorisé dans la direction perpendiculaire au cisaillement imposé. De plus ce comportement général dégagé par cette étude sera amplifié par l'augmentation de la contrainte normale.

Finalement, il a été démontré que la transmissivité intrinsèque n'est pas proportionnelle au niveau de dilatance d'une fracture.

CHAPITRE 7
ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES SURFACES DE LA FRACTURE
POST CISAILLEMENT

CHAPITRE 7

ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES SURFACES DE LA FRACTURE

POST CISAILLEMENT

7.1 Introduction

Le passage du patron de récupération au patron de l'écoulement dans la fracture a été amorcé dans l'analyse des résultats des essais hydromécaniques du chapitre 6. Cependant, ce passage exige une meilleure connaissance de la géométrie de l'espace des vides et de son évolution au cours du cisaillement. Ceci peut se faire au moyen de cartes des vides obtenus par moulage et par l'analyse des surfaces dégradées en fonction du cisaillement. De ces informations pourront être déduits des réseaux de chenaux probables en fonction du cisaillement nécessaire à une modélisation hydraulique.

Ce chapitre se divise en deux parties. La première partie effectue une analyse géostatistique (avant et après cisaillement) afin d'évaluer l'évolution de la détérioration des aspérités. La deuxième partie analyse les moulages des vides.

7.2 Analyse géostatistique avant et après cisaillement.

7.2.1 Application de l'étude des variogrammes aux surfaces des fractures.

Les variogrammes moyens d'ordre 0, 1, 2 ont été calculés pour les quatre directions (0, 1, 4 et 5) pour chaque réplique avant et après cisaillement. Le variogramme d'ordre 0 fut calculé par la formule 4.10 alors que les variogrammes d'ordre 1 et 2 par la formule 4.14 avec k égal à 1 et 2 respectivement.

Les variogrammes moyens d'ordre 0, 1 et 2, avant et après cisaillement, de la direction d'enregistrement des profils 0 pour l'essai réalisé à 9 MPa de contrainte normale et dans la direction de cisaillement de 90° sont présentés à la figure 7.1. Les variogrammes moyens d'ordre 0, 1 et 2, avant et après cisaillement, des autres directions d'enregistrements de cet essai (1, 4 et 5) et les variogrammes moyens d'ordre 0, 1 et 2, avant et après cisaillement, des autres essais sont présentés à l'annexe 11.

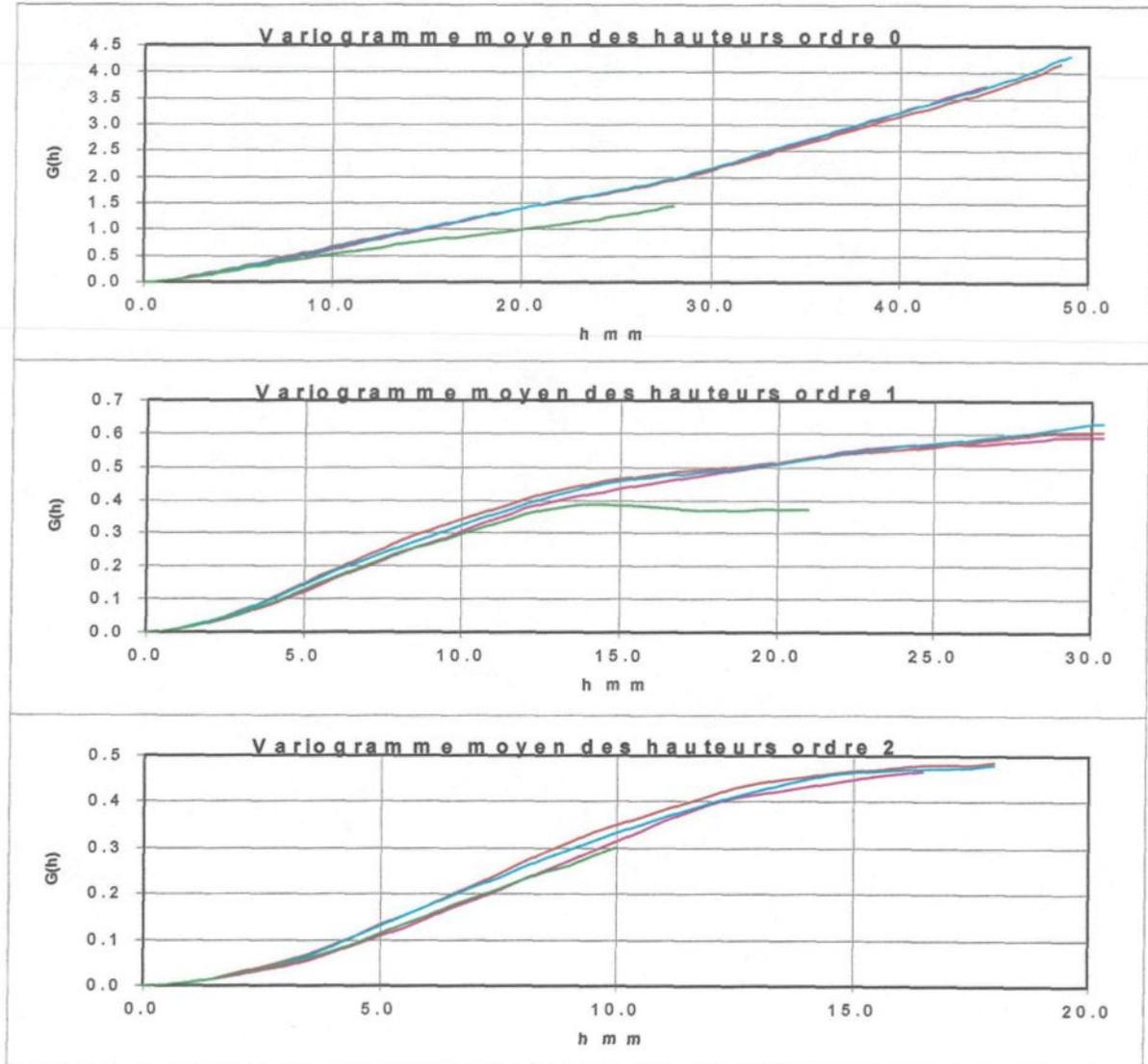


Figure 7.1: Variogrammes moyens des hauteurs d'ordre 0, 1 et 2 de la direction 0 d'enregistrement des profils pour les épontes A et B cisailés à 9 MPa de contrainte normale dans la direction de cisaillement 90° . Les courbes brune et verte représentent respectivement l'éponte A avant et après cisaillement. Les courbes bleue et rose représentent respectivement l'éponte B avant et après cisaillement.

Avant cisaillement

Les portées et variances des structures déduites de ces variogrammes avant cisaillement sont données au tableau 7.1.

Tableau 7.1: Structures avant cisaillement.

Direction des profils	Structure	Portée mm	Variance mm ²	Éponte A=Rose B=Grise
0	X	28	1,9	A-B
	Y	14	0,44	A-B
	Z	11	0,33	A-B
1	X	29	1,05-0,98	A-B
	Y	15,5	0,78	A
	Y'	20	0,95	B
	Z	9	0,26	B
	W	5	0,14	A
4	X'	40	4,5	A-B faible
	X	25	2,4	A-B
	Y	14	0,68	A-B
5	X	25	2,8	A-B
	Y	11	0,53	A-B

En résumé on retrouve la structure X dans les quatre directions d'enregistrement de profils des épontes A et B alors que la structure Y se retrouve dans les quatre directions d'enregistrement des profils de l'éponte A et dans trois directions de l'éponte B. La direction qui ne montre pas cette structure en présente une semblable pour une portée un peu plus grande de 20 mm. Ces deux structures sont qualifiées de majeures pour cette fracture. Les autres structures sont plus localisées selon une direction spécifique.

Après cisaillement

L'examen, par direction de cisaillement, de l'évolution des structures identifiées précédemment permet de noter une tendance à la détérioration négative (diminution de la variance de la structure par arasement des aspérités) (figure 7.1 et annexe 11). La détérioration positive (augmentation de la variance de la structure par arasement des aspérités) est plutôt rare et se retrouve à l'occasion pour des portées supérieures à 25 mm (annexe 11). Pour une même direction de cisaillement les variogrammes sont très similaires. Toutefois, il arrive quelquefois que les variogrammes s'écartent un peu, surtout pour les essais à contrainte normale plus élevée, indiquant une plus grande détérioration. L'attaque des structures a été synthétisée sur la figure 7.2, par direction de cisaillement. Les essais dans la direction 270° démontrent une plus grande détérioration de ces structures. Inversement, les essais dans la direction 90° montrent peu de détérioration. Les deux autres directions opposées (0° et 180°) montrent une détérioration intermédiaire de ces structures. Étant donné que la prise de profils s'est faite à la fin des essais hydromécaniques, la détérioration observée l'est uniquement entre 2 et 4 mm de déplacement tangentiel. Mais, la détérioration de ces structures a pris place progressivement avec l'augmentation du déplacement tangentiel (après le pic de cisaillement) tel qu'observé par Flamand (2000).

7.2.2: Comparaison entre l'évolution de la morphologie des surfaces de la fracture et l'écoulement.

Au chapitre 6, dans la partie de l'analyse mécanique, les essais dans les directions 270° et 90° démontrent respectivement les plus fortes et plus faibles dilatances. Dans ce même

chapitre, à la section hydraulique, les essais dans les directions 270° et 90° montrent respectivement les plus faibles et plus fortes transmissivités intrinsèques à l'inverse des dilatances. Comme mentionné précédemment, ce sont les essais dans les directions 270° et 90° qui montrent respectivement le plus et le moins de détérioration. Cette détérioration est associée à l'arrasement et à la mise en suspension de particules. D'après cette étude et les études antérieures (Teufel, 1987; Makurat et al., 1990), il est démontré que les particules en suspension diminuent la transmissivité intrinsèque de la fracture. Donc, la plus grande détérioration des structures dans les essais de la direction 270° semble avoir entraîné une diminution importante de la transmissivité intrinsèque de la fracture. Le contraire semble aussi vrai pour les essais dans la direction 90° . Ce phénomène de détérioration des structures observé ici s'ajoute à celui schématisé à la figure 6.23 du chapitre 6 comme hypothèse d'explication montrant que la direction de plus grande dilatance (270°) démontre la plus petite transmissivité. Finalement, d'après la figure 6.23 du chapitre 6 montrant la structure majeure représentée par une pente ascendante, il est normal de retrouver le plus de détérioration dans la direction 270° et le moins de détérioration dans la direction 90° . De même il est normal de retrouver plus de détérioration avec l'augmentation de la contrainte normale.

7.2.3 Conclusion

L'analyse morphologique des répliques a permis:

- d'identifier, à l'aide des variogrammes moyens par direction, les structures de la surface avant cisaillement;

- d'évaluer la détérioration de ces structures après cisaillement;
- de relier la dégradation des aspérités des structure à la transmissivité intrinsèque de la fracture;

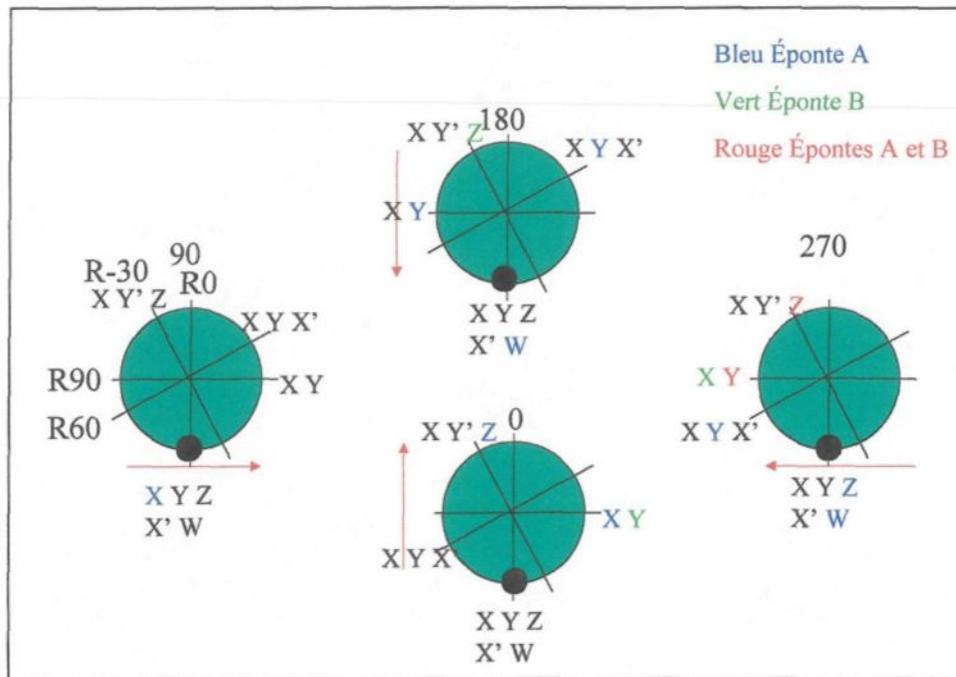


Figure 7.2: Vue en plan montrant l'état des structures après cisaillement de l'éponte inférieure. Les flèches rouges indiquent le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement de la réplique. Le point noir représente le pion. Les chiffres 0, 90, 180, 270 représentent les directions de cisaillement. Les chiffres R0, R-30, R60 et R90 représentent les directions d'enregistrement des profils. Les couleurs bleu (éponte A), vert (éponte B) et rouge (les deux épontes) sur lettres représentent les structures montrant de la dégradation.

7.3 Moulage des vides

7.3.1 Introduction

Il est très difficile d'obtenir une description complète de la géométrie du vide fissural. La technique la plus couramment utilisée est la prise de profils de chacune des épontes de la fracture à l'aide d'un rugosimètre. Elle a été utilisée par de nombreux auteurs, dont Bandis et al. (1983), Barton et al. (1985) et Gentier (1986). Une autre technique a été tentée à l'université de Berkeley (Pyrac-Nolte et al., 1987) qui consiste en l'injection d'un métal à bas point de fusion dans la fracture. Pour que la description d'une fracture soit complète, il faut ensuite que les différents profils qui la décrivent soient calés les uns par rapport aux autres. Finalement, Gentier et al. (1988), ont développé une technique qui repose sur le moulage du vide fissural à l'aide d'une résine translucide.

C'est cette technique qui a été utilisée dans cette étude qui est décrite brièvement avec les résultats obtenus. Puis, une nouvelle technique de prise d'empreintes d'une fracture en cisaillement sous contrainte normale est exposée. Finalement, les résultats obtenus sont présentés et une comparaison entre les moulages des vides de fin d'essai et les patrons de récupération analysés.

7.3.2 Prise d'empreintes avant cisaillement

Le moulage systématique des vides a été réalisé sur les 20 paires de répliques avant cisaillement du programme d'essais de 1996. Comme mentionné plus haut, la méthode de moulage des vides utilisée est celle développée par Gentier et al. (1988). Toutefois une

nouvelle résine, à prise rapide, a été employée (rapport interne du BRGM). Cette technique est résumée à la figure 7.3.

La résine est coulée sur une des épontes, la seconde éponte est ajustée sur la première, puis la prise se fait en 20 minutes à température ambiante, sous contrainte nulle à l'exception du poids de l'échantillon. Une fois la réticulation complète, l'empreinte obtenue est démoulée. C'est une sorte de crêpe, très fine. Pour éviter le déchirement, une épaisseur plus importante de résine transparente est coulée sur le film après qu'une des deux épontes ait été enlevée. Les deux couches de résine, adhérant entre elles, peuvent ensuite être démoulées facilement ensemble. On obtient ainsi un moulage bi-couche. La couche fine reproduit la forme de l'espace fissural. L'autre couche, plus épaisse, est plane d'un côté et adhère parfaitement à la première couche de l'autre côté. Cette seconde couche, transparente, ne sert que de support mécanique (figure 7.4). Chaque fois qu'un moulage des vides est réalisé, un étalon, dont la variation d'épaisseur est connue, est moulé avec la même résine (figure 7.4).

La répartition des moulages des répliques avec les coins étalons correspondant est présenté au tableau 7.2.

Tableau:7.2: Moulage des vides des répliques du programme d'essai.

Numéro des répliques	Numéro des coins étalons
01, 02, 03, 04, 05	1
06, 07, 08, 09, 10	2
11, 12, 13, 14, 15	3
16, 17, 18, 19, 20	4

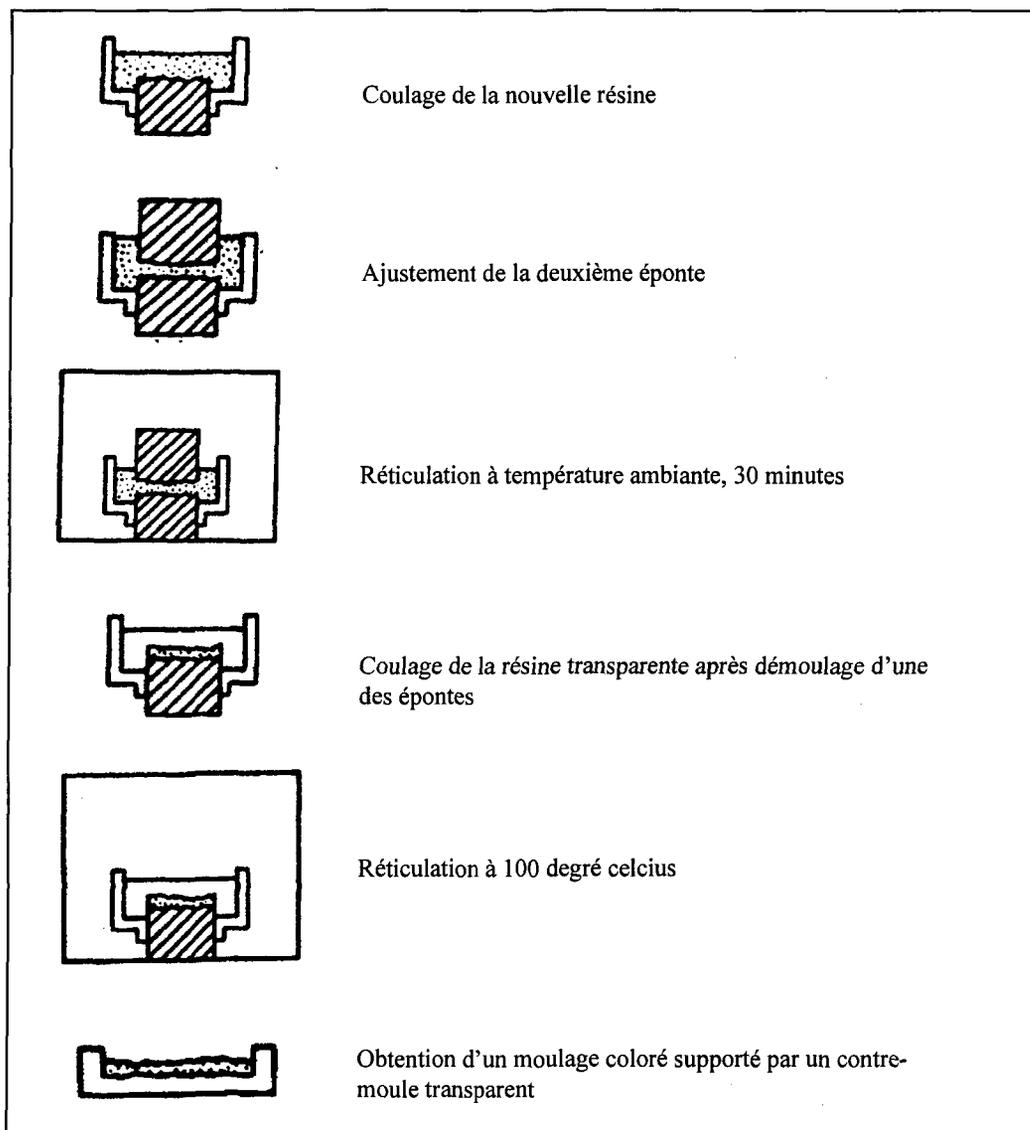


Figure 7.3: Technique d'obtention des empreintes

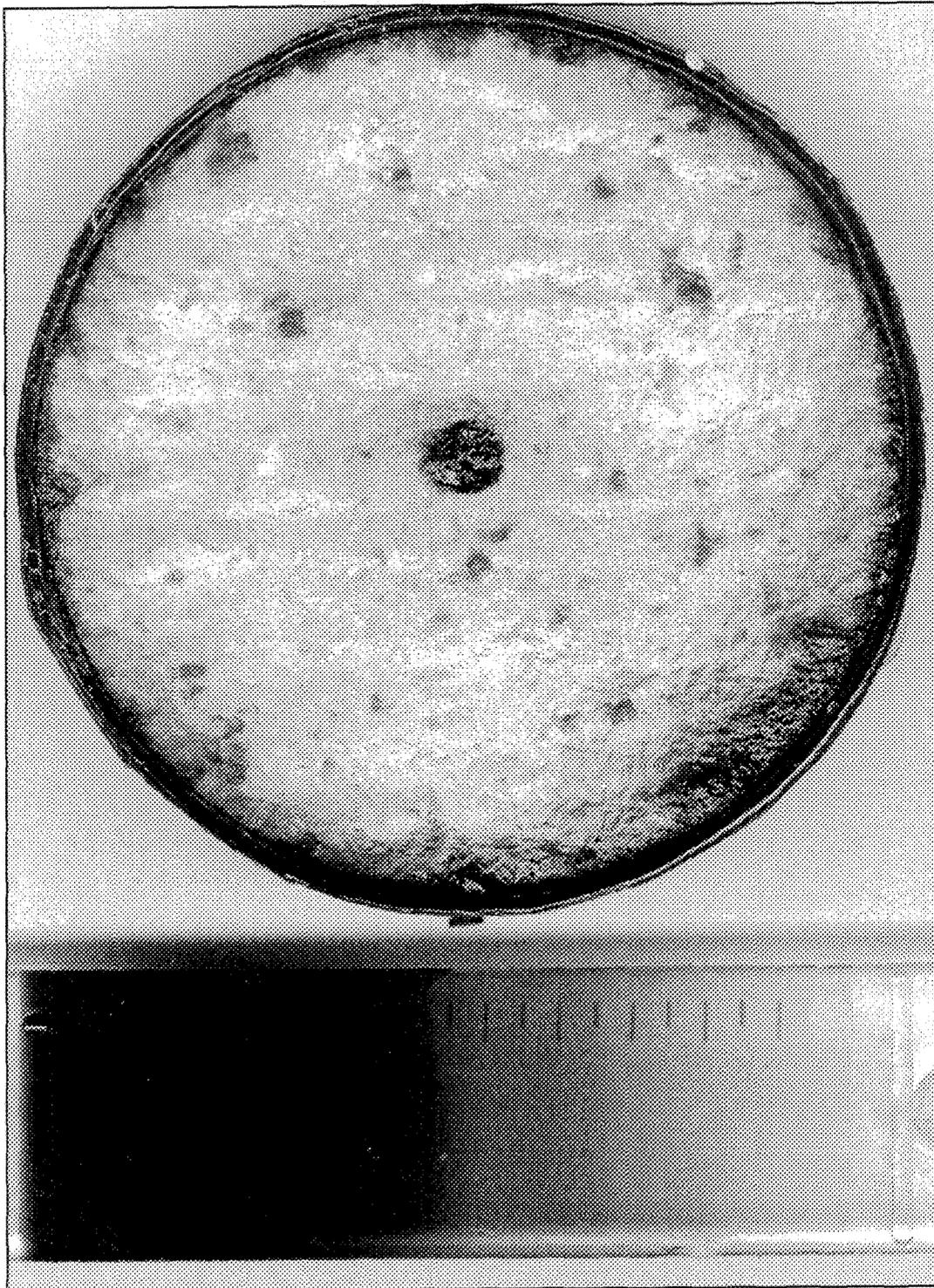


Figure 7.4: Empreinte finale avant cisaillement et coin étalon

7.3.3 Moulage des vides sous contrainte normale d'une fracture en cisaillement

7.3.3.1 Introduction

Avec la résine à prise plus rapide, un nouveau prototype d'injection a été développé permettant le moulage des vides sous contrainte d'une fracture en cisaillement. Ce prototype d'injection, très rudimentaire, mais efficace, a permis d'obtenir 1) deux moulages des vides avant le pic de cisaillement et 2) les moulages des vides au dernier pas de cisaillement des essais hydromécaniques.

7.3.3.2 Protocole de l'injection de la résine

- Après avoir atteint le dernier pas de cisaillement désiré (essais 1 et 3) ou à la fin des essais lorsqu'on remarque une fuite, l'essai hydromécanique est arrêté, le système d'injection de fluide est débranché, mais les contraintes sont maintenues.
- Préparation de la résine (environ 50 ml).
- Déversement de la résine dans une seringue. Faire sortir l'air restant dans la seringue avant l'injection.
- Installation de la seringue dans l'injecteur.
- Raccordement de la seringue avec le tuyau d'injection du fluide de la fracture.
- Injection de la résine (2 à 3 minutes).
- Temps de prise (environ 15 minutes).
- Déchargement de la presse de cisaillement.

7.3.3.3 Démoulage

Une fois la réplique sortie de la machine de cisaillement, il faut décoller le système de récupération (sauf pour les essais R01 et R03). Par la suite, on sépare les deux épontes. Normalement, l’empreinte des vides colle à l’éponte A qui est de couleur rouge. Mais, quelquefois, c’est la situation inverse qui se produit. La dernière étape consiste à fabriquer des supports mécaniques transparents aux empreintes.

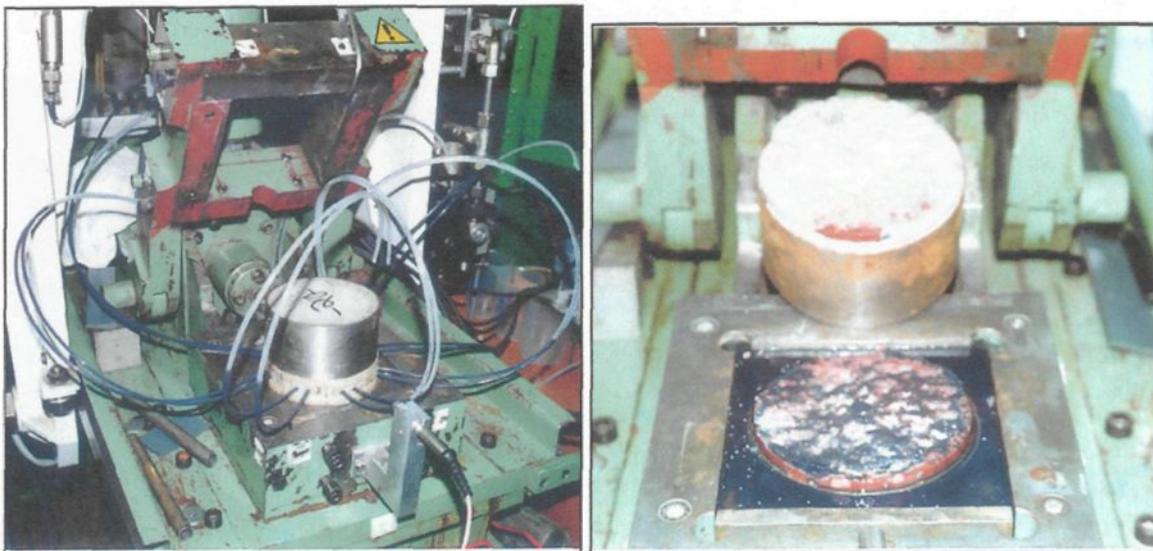


Photo 7.1: Injection de la résine **Photo 7.2: Séparation des épontes lors du démoulage**

7.3.3.4 Étude de pré-faisabilité de moulage des vides d’une fracture en cisaillement sous contrainte normale avant le pic de cisaillement

Des tentatives de moulage des vides sous contrainte ont été faites à de petits déplacements tangentiels (essais R01, R03 et R14).

Les buts ultimes recherchés dans ces études de moulage des vides d'une fracture en cisaillement sous contrainte normale étaient d'étudier le nombre et l'évolution des contacts entre les aspérités des deux épontes avant le pic de cisaillement. Un autre but était de vérifier, pour un déplacement tangentiel donné, la correspondance entre la récupération compartimentée enregistrée et la carte des vides.

L'essai R01 fût réalisé, sous une contrainte normale de 5 MPa, jusqu'à un déplacement tangentiel de 0.334 mm (à proximité du pic de cisaillement). La dilatance totale pour ce déplacement tangentiel est de 0,084 mm. La figure 7.5 montre les courbes de résistance et de dilatance de cet essai.

L'essai se déroula très bien et l'injection de la résine, la prise et le démoulage furent une réussite. Une fine pellicule trouée représente bien les vides. La figure 7.6 montre le moulage des vides qui repose sur l'éponte inférieure rose. Nous pouvons observer que la majorité des contacts (zones blanches) se trouvent dans les pentes ascendantes des aspérités suivant la direction de cisaillement (figure 7.6a). En effectuant une rotation de 180° de l'éponte, on observe les arrêtes des zones de contacts (figure 7.6b). On remarque aussi que les plages de contacts ou arrêtes s'allongent perpendiculairement à la direction de cisaillement.

Par la suite, le traitement des empreintes suivant la technique développée par Gentier et al. (1988) n'a pas pu être réalisée. En effet, les proportions pour le mélange de la résine en fonction de l'épaisseur de l'empreinte des vides n'étaient pas bonnes. La dynamique n'était donc pas bonne et par conséquent le traitement de l'empreinte n'était pas possible.

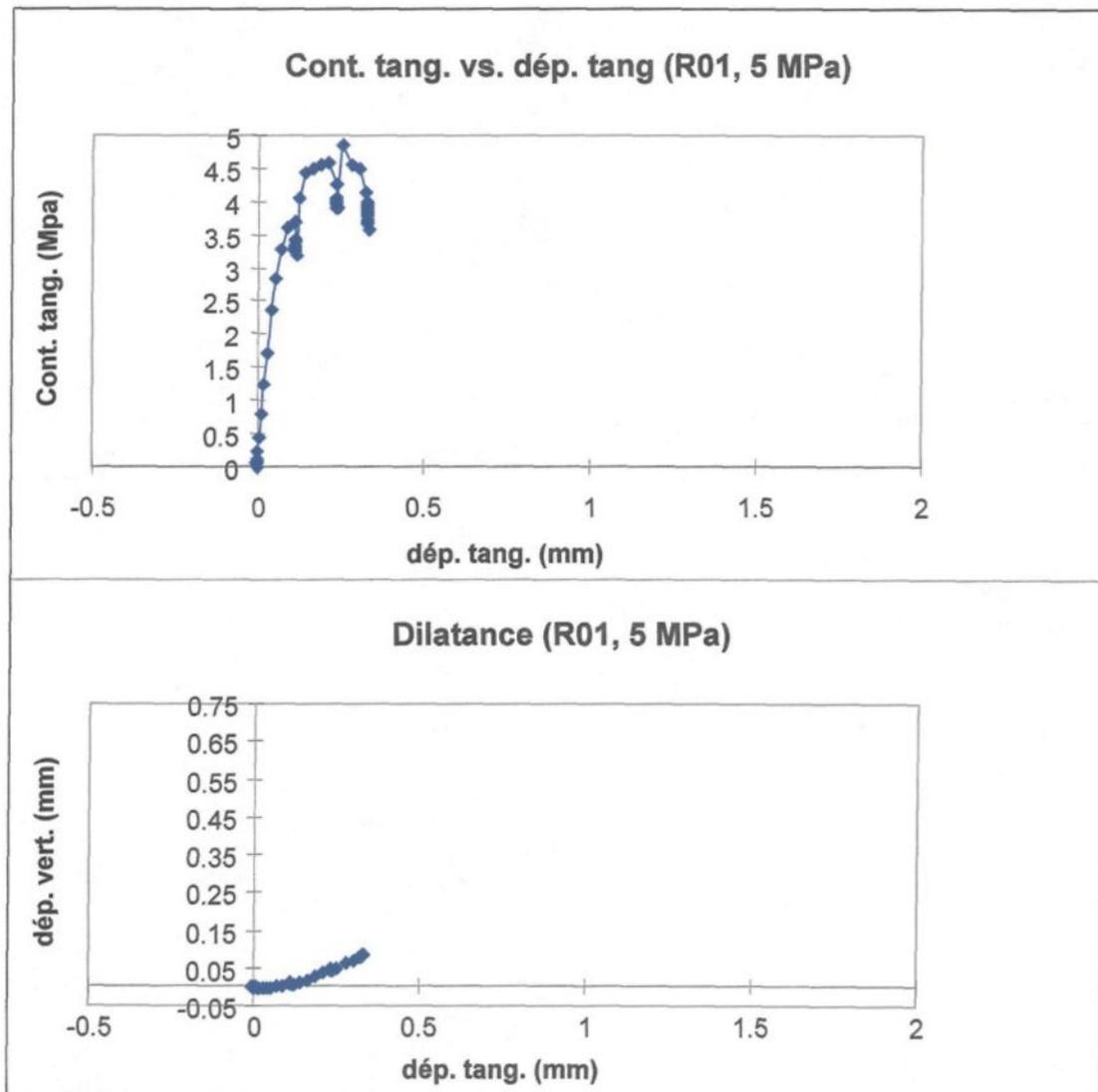


Figure 7.5: Courbes de résistance et de dilatance de l'essai R01

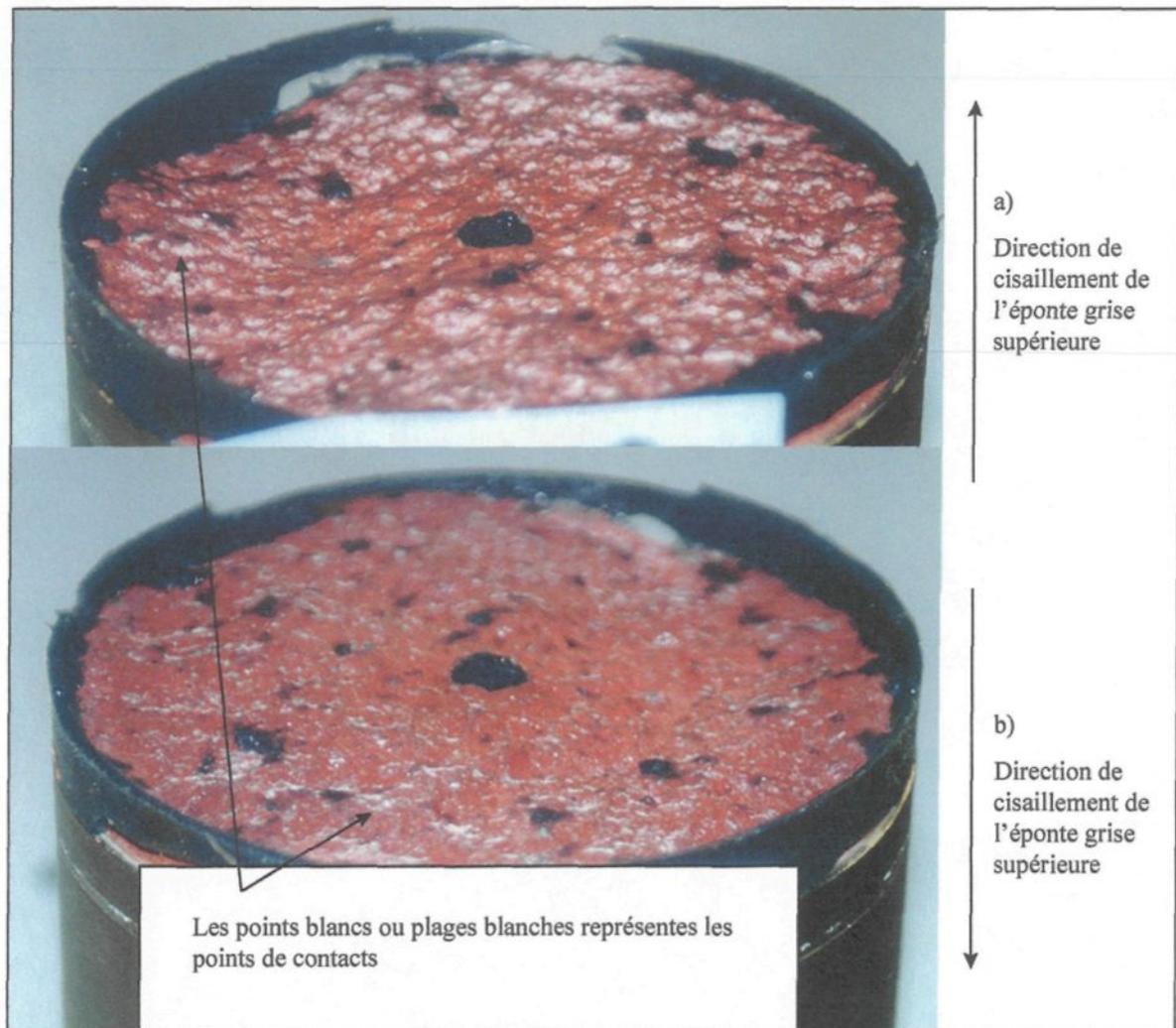


Figure 7.6: Moulages des vides de l'essai R01

L'essai R03 fût cisailé, sous une contrainte normale de 5 Mpa, jusqu'à un déplacement tangentiel de 0.1 mm. Ce déplacement tangentiel a engendré une dilatance totale de 0.009 mm. La figure 7.7 montre les courbes contrainte-déplacement en cisaillement et de dilatance de cet essai.

L'essai se déroula très bien et l'injection de la résine, la prise et le démoulage furent une réussite. Une très fine pellicule trouée représente bien les vides. La figure 7.8 montre le moulage des vides qui repose sur l'éponte inférieure rose. On observe plus de zones en contacts (zones blanches) en regardant dans la même direction que le cisaillement (7.8a) que dans la direction inverse (7.8b). Les différences remarquées entre ce moulage et celui de la réplique 01 sont:

- L'empreinte des vides est beaucoup plus fine;
- Les zones de contacts ne sont pas ordonnées suivant une direction perpendiculaire au cisaillement.

Pour la suite, étant donné que nous avons le même mélange de résine que l'essai R03, les mêmes constatations s'appliquent pour le traitement.

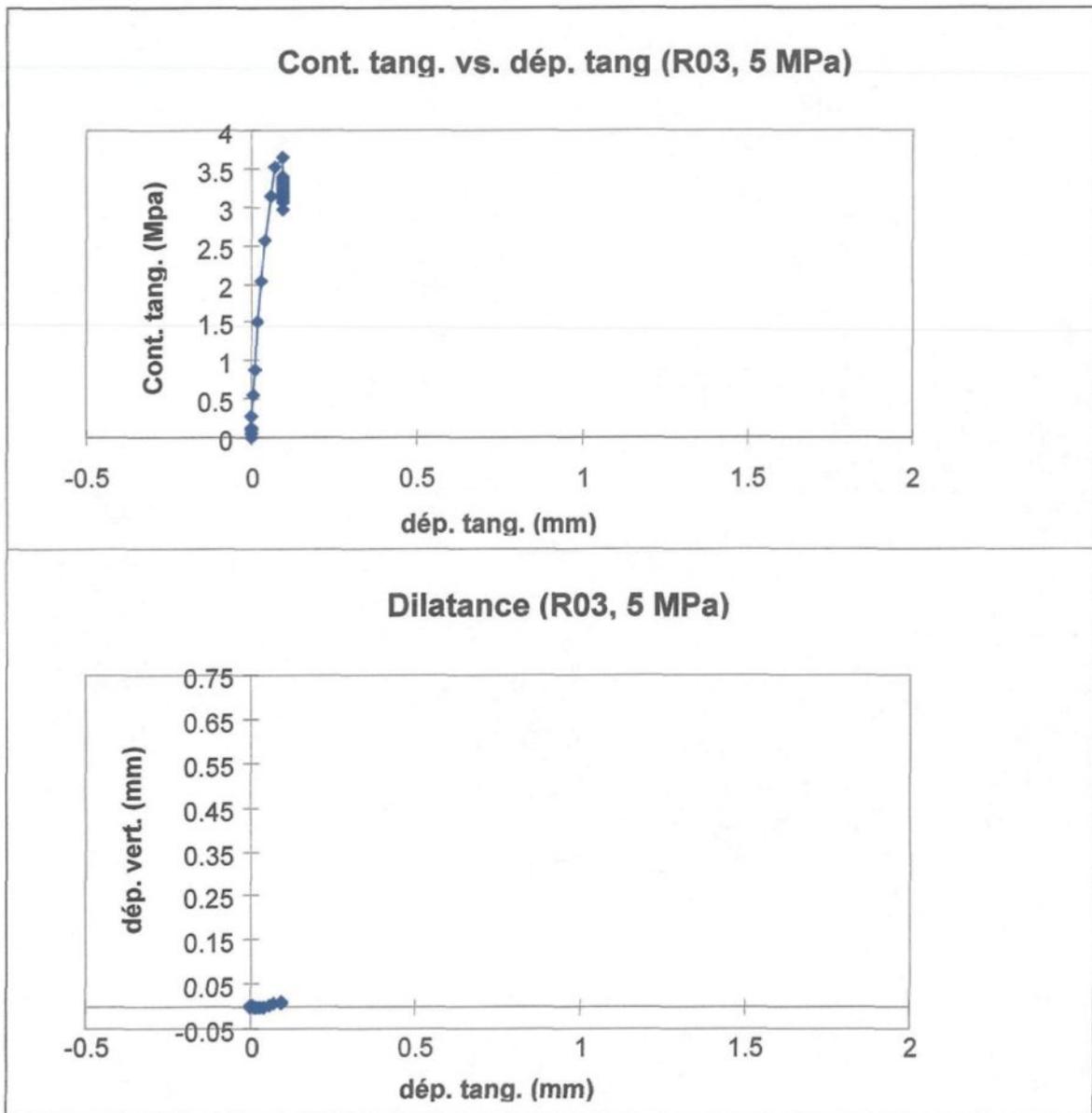


Figure 7.7: Courbes de résistance et de dilatance de l'essai R03

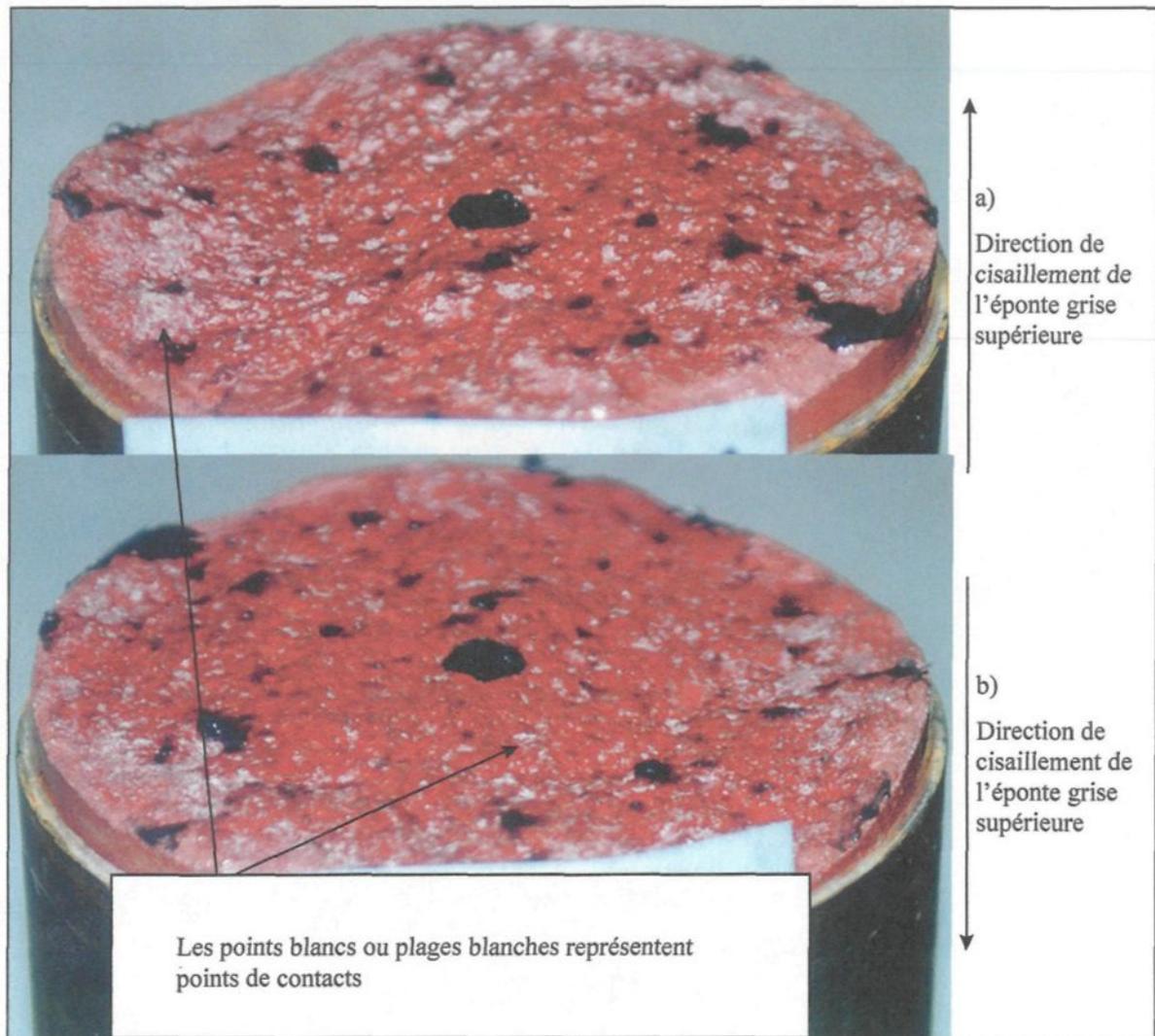


Figure 7.8: Moulage des vides de la réplique R03

Pour l'essai R14, le moulage s'arrêta par l'incapacité de séparer lentement les deux épontes sans abîmer complètement le moulage.

7.3.3.5 Discussion

Les buts recherchés dans l'injection de résine sous contrainte normale d'une fracture en cisaillement n'ont pas pu être rencontrés. Cependant, les premiers pas ont été réalisés (avec quelques résultats qualitatifs) dans l'étude des vides d'une fracture sous contrainte normale en cisaillement.

En effet, à partir des essais R01 et R03, il est possible d'observer comment évolue qualitativement les zones de contacts jusqu'au pic de la résistance au cisaillement. Aussitôt que la dilatance se mobilise (avec le déplacement tangentiel) les zones de contact aléatoires présentes en début d'essai se concentrent graduellement dans les pentes ascendantes des aspérités selon la direction de cisaillement. De plus, ces points ou zones de contact s'alignent ou s'amalgament graduellement suivant une direction perpendiculaire à la direction de cisaillement. Donc de la position initiale à la position du pic de résistance au cisaillement, les contacts entre les deux épontes évoluent d'une situation aléatoire à une situation plus organisée. Ces résultats préliminaires sont très encourageants et des études ultérieures permettront d'atteindre les buts recherchés.

7.3.4 Moulages des vides à la fin des essais hydromécaniques en cisaillement

Des moulages des vides ont été faits systématiquement à la fin de tous les essais hydromécaniques. L'injection de la résine, la prise et le démoulage se sont bien déroulés pour l'ensemble des essais.

Pour les essais aux niveaux de contrainte normale de 3, 5, et 7 MPa, nous avons réussi à fabriquer des supports transparents (RTV 141) aux empreintes. Pour les essais à 9 MPa de contrainte normale, il a été impossible de fabriquer des supports transparents. À ce niveau de contrainte normale, les empreintes recueillies étaient trop abîmées et non traitables. Étant donné que tous les essais se sont terminés entre 3 et 5 mm de déplacement tangentiel, il est normal de retrouver beaucoup de matériels de broyage mélangé avec la résine. Ce matériel entraîne des problèmes insurmontables dans le traitement des empreintes.

Les figures 7.9 à 7.20 présentent, par direction de cisaillement, les empreintes des vides prises à la fin des essais ainsi que la dernière récupération directionnelle de l'écoulement à 1 l/h.

7.3.4.1 Comparaison entre la récupération par secteur et les moulages de fin d'essais

La comparaison entre l'image des vides obtenue à la fin des essais et les patrons de récupération peut être faite en tenant compte que pour tous les essais, l'image des vides a été obtenue à un pas de cisaillement de 1 mm supérieur à l'enregistrement de la dernière phase de récupération par secteur. Ceci est engendré par le protocole d'essai qui arrête l'essai quand une fuite apparaît. Lors des essais, la majorité des fuites sont apparues immédiatement après un pas de cisaillement. Donc, les derniers enregistrements hydrauliques ont été faits un pas de cisaillement avant la fin des essais et le moulage des vides.

Pour la direction de cisaillement 0° , l'anisotropie d'écoulement perpendiculaire à la direction de cisaillement, mentionnée au chapitre 6, était plutôt mal développée au niveau de contrainte normale de 3 MPa (figure 7.9). Cette anisotropie prend de l'ampleur avec la hausse de la contrainte normale (figure 7.10 et 7.11). On constate aussi avec la hausse du niveau de contrainte normale un allongement des zones dégradées dans la direction perpendiculaire au cisaillement et une augmentation de la superficie de ces zones. Donc, pour cette direction, le comportement plutôt isotrope de l'écoulement à un faible niveau de contrainte normale et le développement d'une anisotropie d'écoulement avec la hausse de la contrainte normale (chapitre 6) correspond bien aux images des moulages des vides de la fin des essais (figures 7.9 à 7.11).

Pour la direction de cisaillement 180° , l'anisotropie d'écoulement perpendiculaire à la direction de cisaillement, mentionnée au chapitre 6, est bien développée suivant le secteur 3. L'examen des empreintes finales de ces essais (figure 7.12 et 7.13), permet de visualiser très bien le chenal qui draine le secteur 3. Il est à noter, qu'à la figure 7.13 et les figures (7.16 et 7.18), il faut inverser l'image des vides de 180° . On constate aussi, comme pour la direction de cisaillement 0° , qu'avec la hausse du niveau de contrainte normale un allongement des zones dégradées dans la direction perpendiculaire au cisaillement et une augmentation de la superficie de ces zones.

Pour la direction de cisaillement 90° , l'anisotropie d'écoulement (chapitre 6) est bien développée perpendiculairement à la direction de cisaillement avec une récupération préférentielle dans les secteurs 7, 3, 2 et 4 (figure 7.14 à 7.16). En examinant les empreintes finales de ces essais on observe l'alignement des zones dégradées selon une direction qui est perpendiculaire à la direction de cisaillement (secteurs 2, 3, 4 et 7). Ces alignements s'assemblent, avec l'augmentation de la contrainte normale, pour former une barrière à l'écoulement. On remarque aussi qu'entre deux alignements de zones dégradées, on note le développement d'un chenal important. Donc, pour la direction 90° , la correspondance entre les patrons de récupérations et les empreintes de moulage des vides est évidente. Cependant, il n'est pas évident, d'après ces empreintes, de distinguer entre l'importance de la récupération dans les secteurs 2, 3, 4 et 7. L'image des vides permet aussi de voir des irrégularités provoquées par le montage expérimental. En effet à la figure 7.16, une récupération importante est notée dans le secteur 1. L'analyse de l'image du moulage des vides nous montre que l'écoulement dans le secteur 1 ne provient pas du centre de la fracture mais plutôt au pourtour.

Pour la direction 270° , l'anisotropie d'écoulement est bien développée perpendiculairement à la direction de cisaillement avec une récupération préférentielle dans le secteur 2, 3 et 7 (figures 7.17 à 7.20). L'examen des empreintes finales de ces essais, permet d'observer l'alignement des zones dégradées selon une direction qui est perpendiculaire au cisaillement (secteurs 3 et 7). Ces alignements s'assemblent, avec l'augmentation de la contrainte normale, pour former une barrière à l'écoulement. On

remarque aussi qu'entre deux alignements de zones dégradées, le développement d'un chenal important. Donc, pour la direction 270° , tout comme la direction inverse 90° , il existe une forte correspondance entre les patrons de récupérations et les empreintes de moulage des vides.

Finalement, on note que pour des déplacements tangentiels variant entre 2 et 5 mm, les zones dégradées en contacts s'allongent et s'unissent suivant la direction perpendiculaire au cisaillement. Ce processus entraîne la formation d'une barrière à l'écoulement dans la direction de cisaillement et la formation de chenaux importants dans les vallées entre les alignements des zones dégradées. Avec l'augmentation de la contrainte normale, ce comportement s'amplifie.

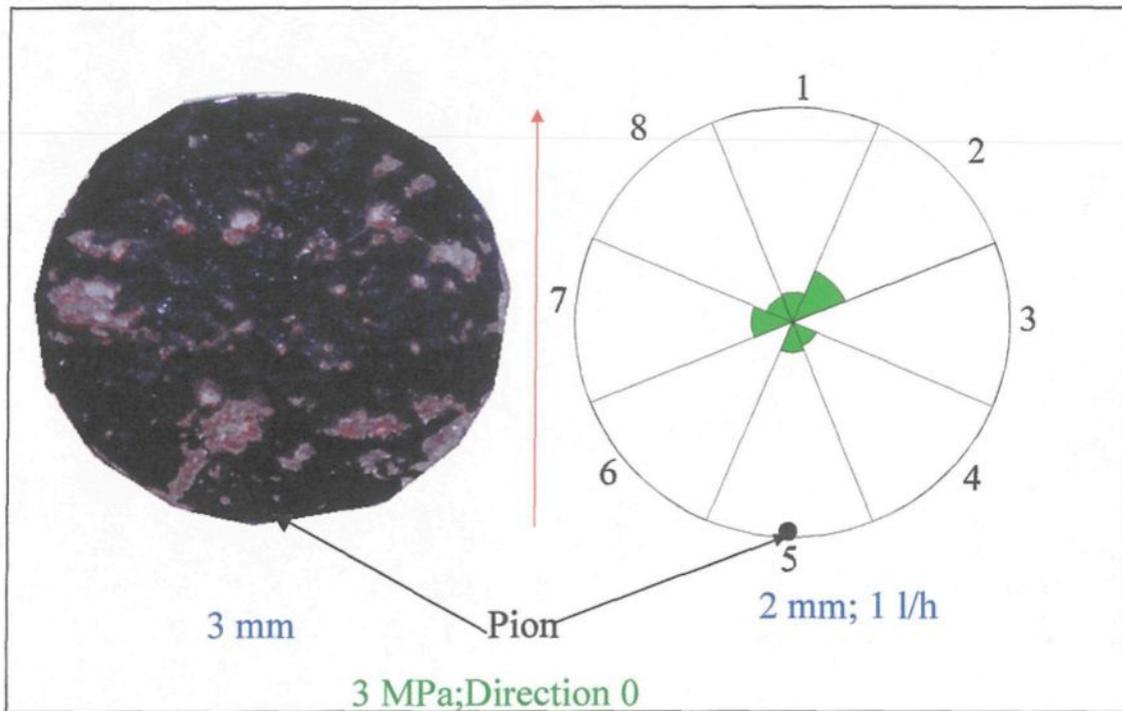


Figure 7.9: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 3 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 0° avec un déplacement tangentiel de 3 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 2 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

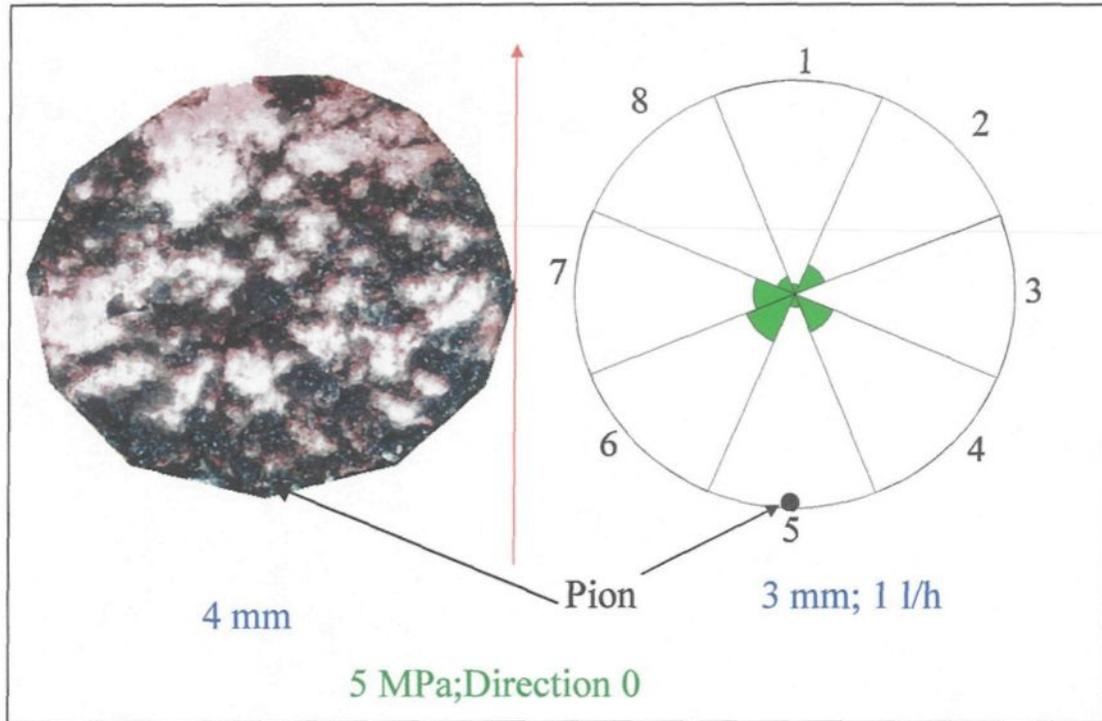


Figure 7.10: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 5 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 0° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 3 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

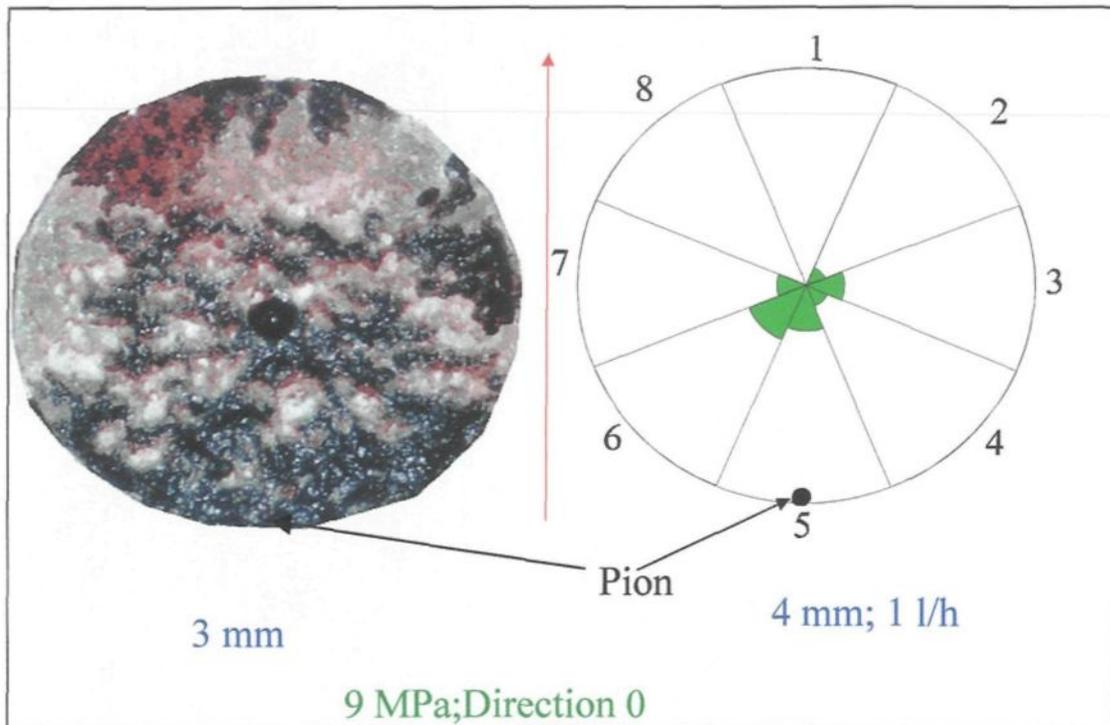


Figure 7.11: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 9 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 0° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 3 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

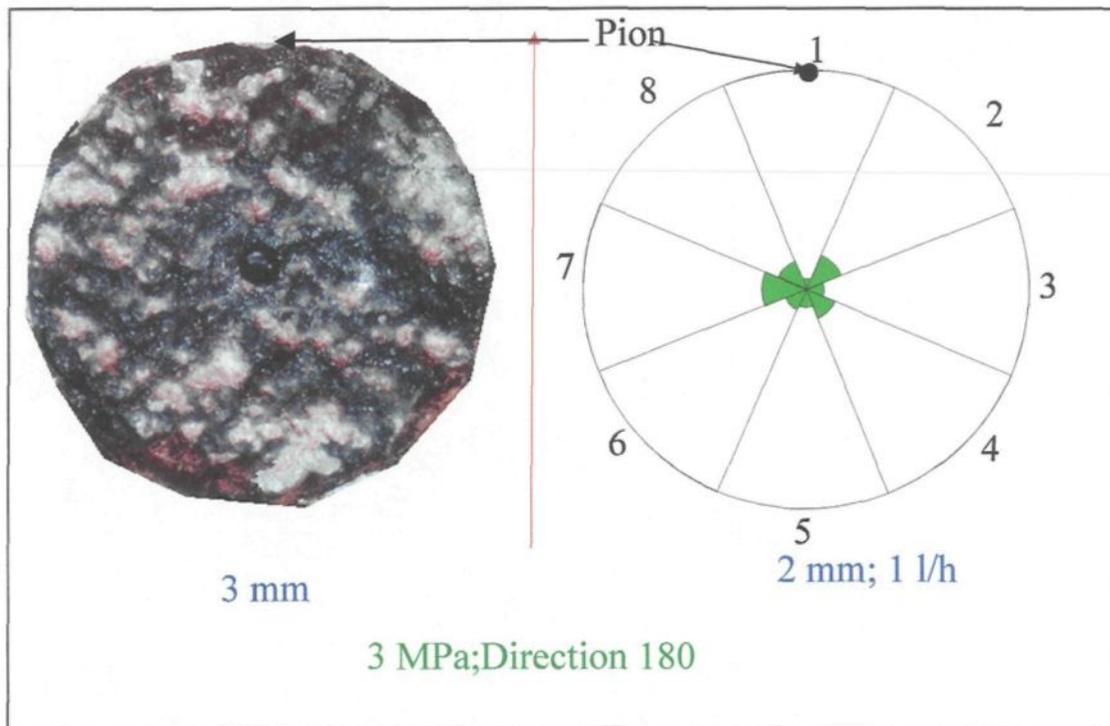


Figure 7.12: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 3 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 180° avec un déplacement tangentiel de 3 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 2 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

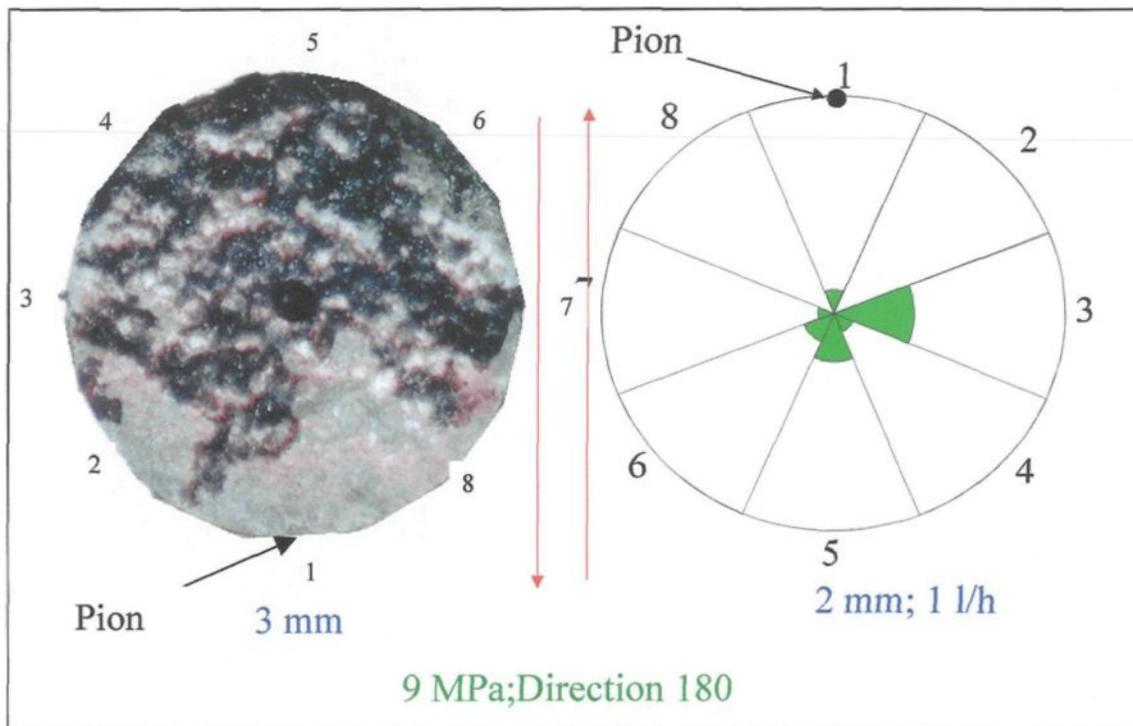


Figure 7.13: Vue en plan de l'éponte supérieure (grise) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 9 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 180° avec un déplacement tangentiel de 3 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 2 mm. Les flèches rouges indiquent les sens de déplacement des épontes supérieure et inférieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

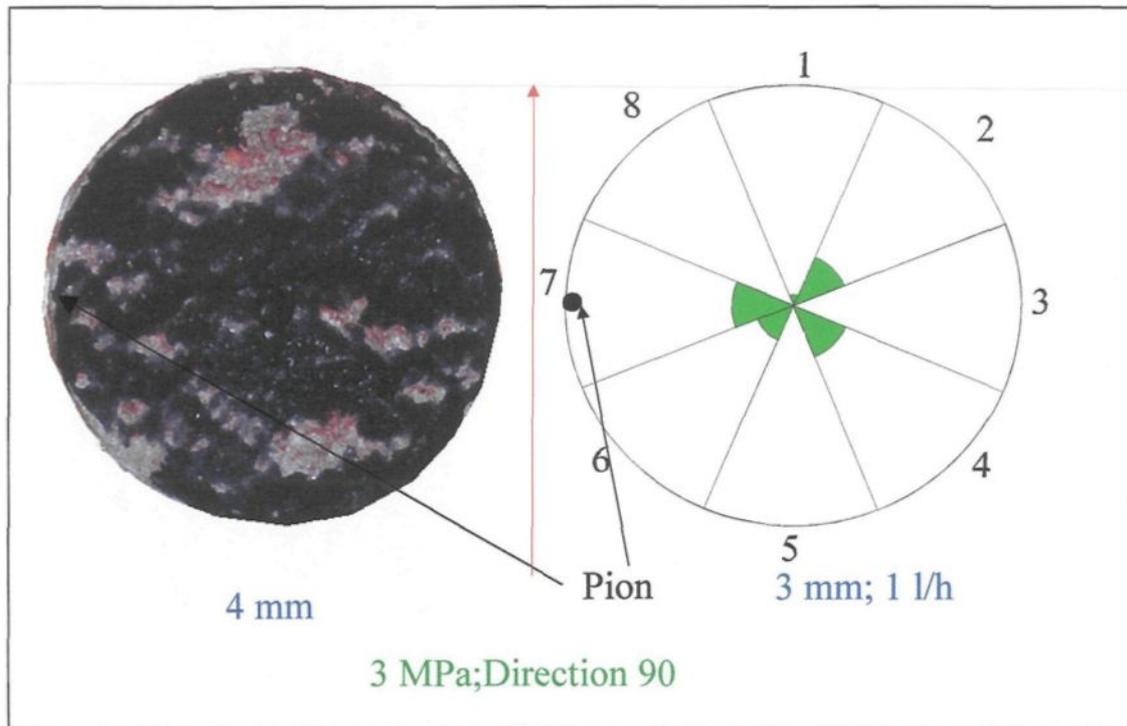


Figure 7.14: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 3 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 90° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 3 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

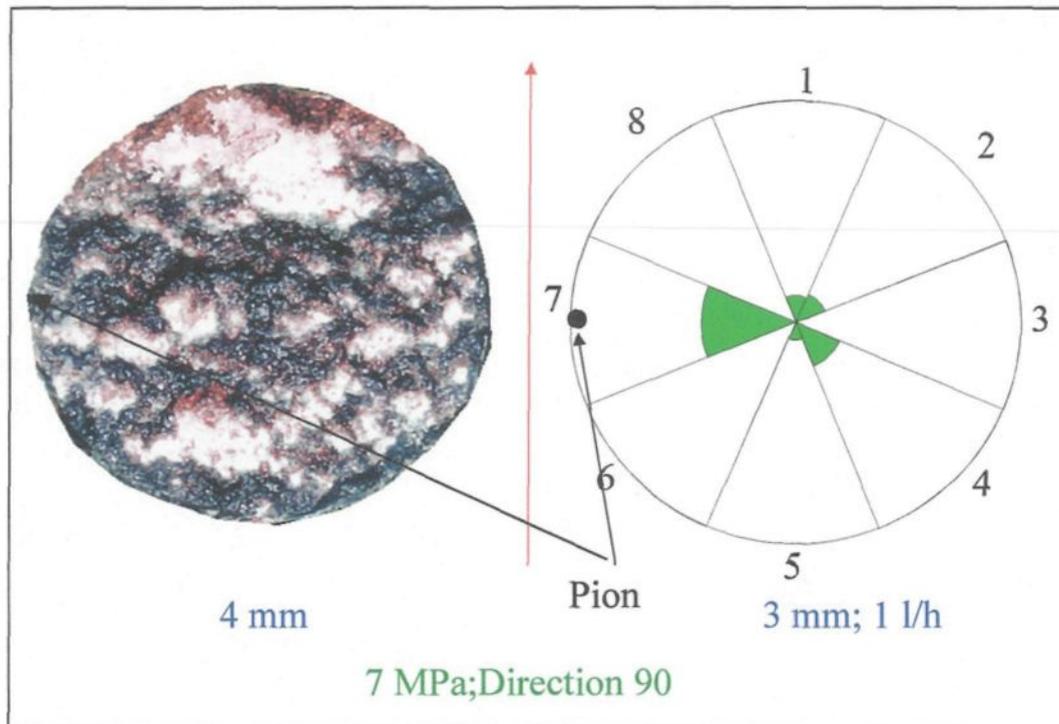


Figure 7.15: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 7 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 90° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 3 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

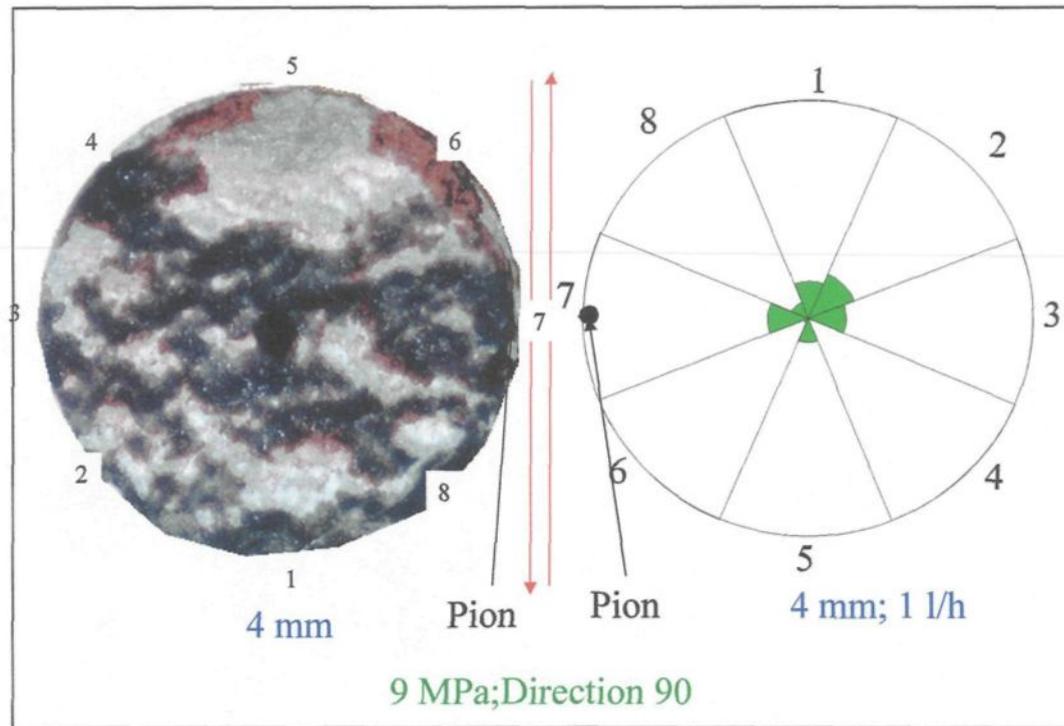


Figure 7.16: Vue en plan de l'éponte supérieure (grise) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 9 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 90° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 4 mm. Les flèches rouges indiquent les sens de déplacement des épontes supérieure et inférieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

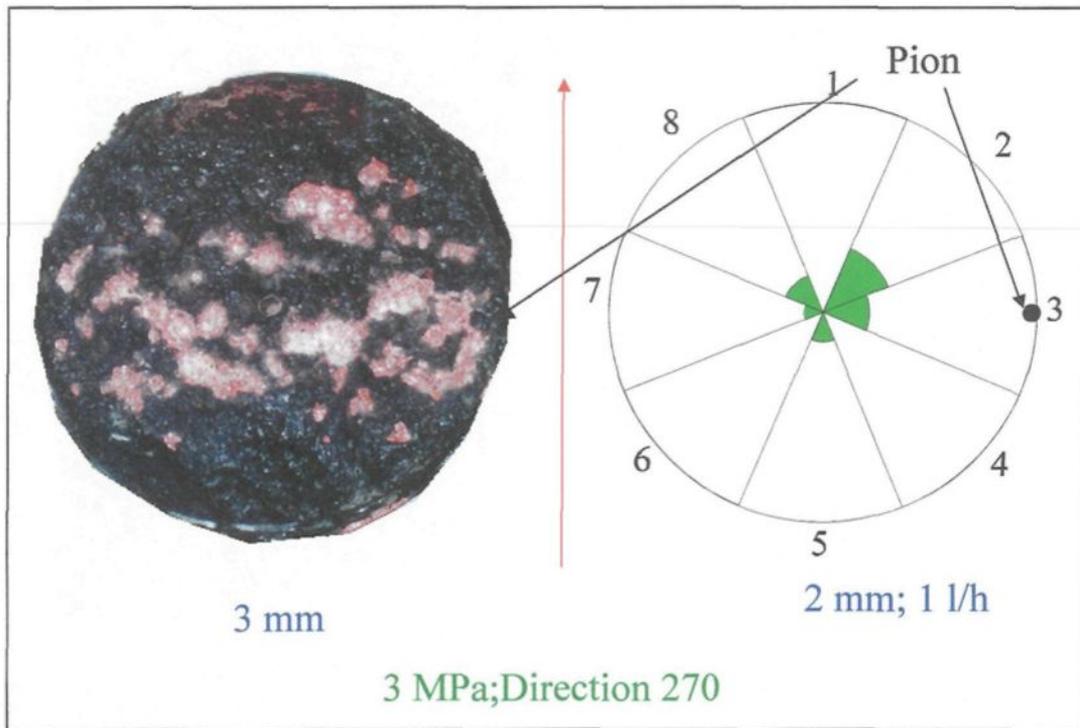


Figure 7.17: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 3 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 270° avec un déplacement tangentiel de 3 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 2 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

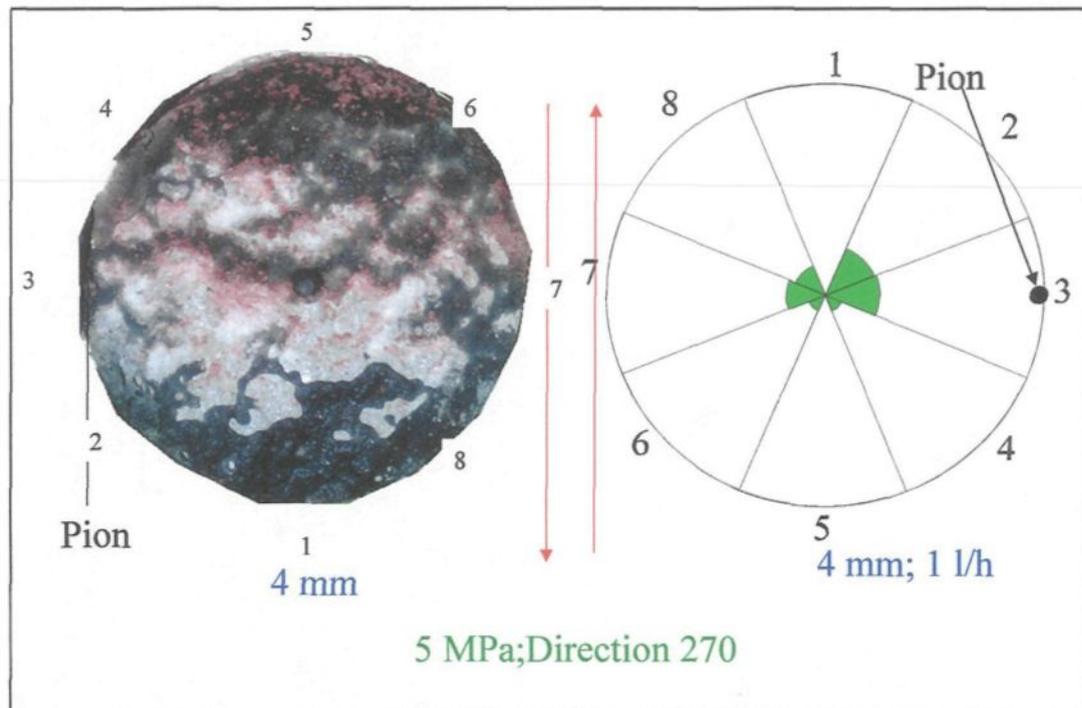


Figure 7.18: Vue en plan de l'éponte supérieure (grise) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 5 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 270° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 4 mm. Les flèches rouges indiquent les sens de déplacement des épontes supérieure et inférieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

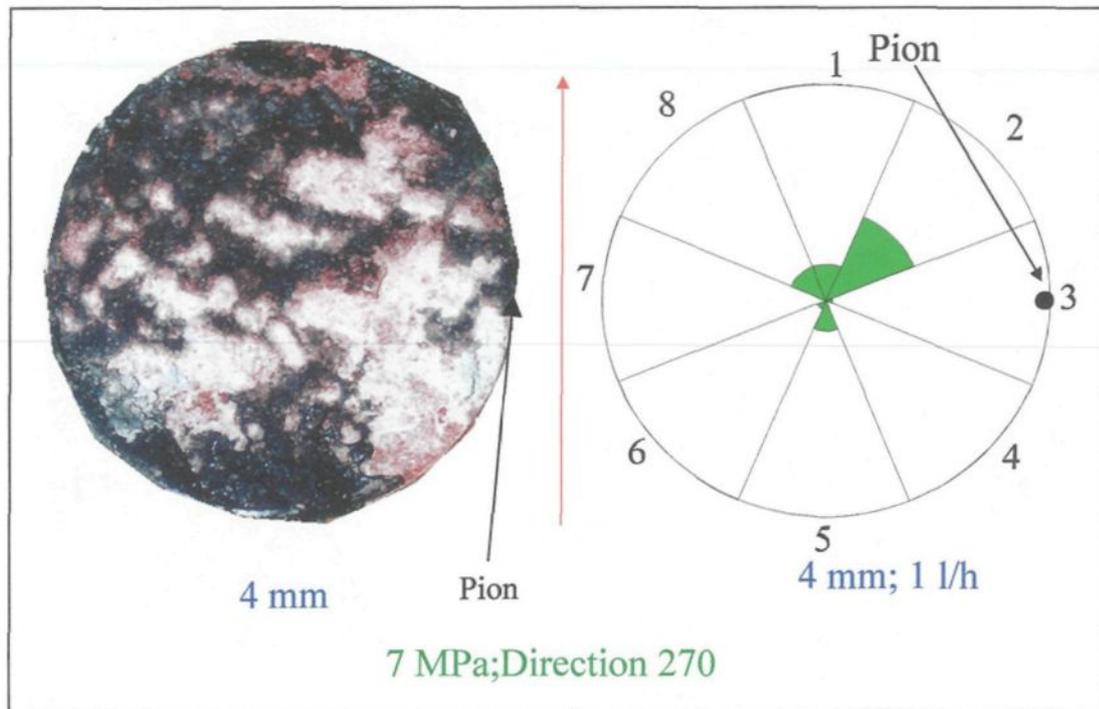


Figure 7.19: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 7 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 270° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 4 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

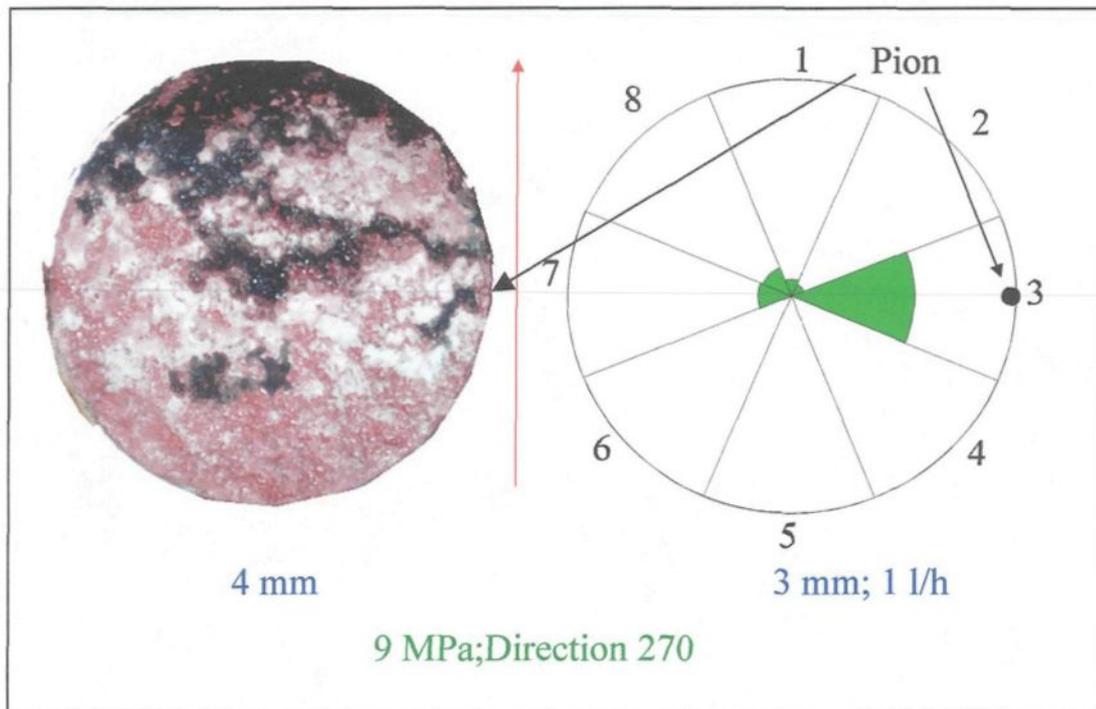


Figure 7.20: Vue en plan de l'éponte inférieure (rose) montrant l'empreinte des vides pour l'essai à 9 MPa de contrainte normale, dans la direction de cisaillement 270° avec un déplacement tangentiel de 4 millimètres juxtaposé à la récupération directionnelle obtenue pour un débit de 1 l/h à un déplacement tangentiel de 3 mm. La flèche rouge indique le sens de déplacement de l'éponte supérieure lors du cisaillement. Couleur noire: vides. Autres couleurs: Zones dégradées et contacts.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche en laboratoire portant sur l'étude hydromécanique d'une fracture en cisaillement a permis l'obtention d'acquis méthodologiques et scientifiques importants. De plus, des recommandations pour des travaux ultérieurs s'imposent.

A) Acquis scientifiques

Contexte général:

La surface de notre fracture (chapitre 4) montre une structure de grande dimension (pente ascendante croissante parallèle à la direction 270°) avec des structures emboîtées de plus petites dimensions. Le cisaillement imposé selon cette pente ascendante (figure 6.23) dans la direction 270° génèrent beaucoup moins de vides que le cisaillement selon la direction opposée (pente descendante). Inversement, la mobilisation de la dilatance et la contrainte nécessaire sont beaucoup plus élevés lors d'un cisaillement imposé selon cette pente ascendante. De plus ce phénomène s'amplifie avec l'augmentation de la contrainte normale et la dégradation des aspérités (plus grande contrainte locale sur les facettes positives d'aspérités lors d'un cisaillement de deux surfaces montrant une pente ascendante).

On peut retenir du côté mécanique que:

- 1) Il apparaît un palier ou une faible contractance, avant la mobilisation de la dilatance, qui s'allonge avec l'augmentation de la contrainte normale. Si la mise en place de la réplique n'est pas parfaite, ce palier est remplacé par de la contractance;
- 2) la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale;
- 3) l'angle de la mobilisation de la dilatance diminue avec l'augmentation de la contrainte normale;
- 4) avec le cisaillement, la fracture se dilate davantage dans la direction de 270° , le moins dans la direction opposée et (moyennement) de façon égale dans les deux autres directions;
- 5) de même la résistance au cisaillement est la plus forte dans la direction de 270° , est la moins élevée dans la direction opposée et entre les deux précédentes dans les deux autres directions;
- 6) la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale;
- 7) au frottement résiduel, l'augmentation de la contrainte normale annule la dilatance dans les directions 0° - 180° et la dilatance augmente toujours selon la direction 270° ;
- 8) les courbes des inclinomètres peuvent séparées en deux parties distinctes avant et après le pic de cisaillement;
- 9) au pic et à un déplacement tangentiel de 3 mm, l'angle de l'inclinomètre parallèle au cisaillement est plus élevé dans la direction 270° et aussi pour le niveau de contrainte de 9 MPa;
- 10) la quantité de dilatance varie avec la direction de cisaillement. Ces mesures des variations en fonction de la direction de cisaillement nous amènent à montrer l'existence

d'une structure de grande dimension présentée à la fin du chapitre 4 (plan moyen ascendant (éponge inférieure rose) dans la direction 270°) jouant un rôle de premier plan par rapport aux différents résultats mécanique obtenus.

On peut retenir du côté hydraulique global que:

1) Pour l'ensemble des essais (différentes contraintes normales et directions de cisaillement), la transmissivité intrinsèque globale est comprise dans une courbe enveloppe d'environ un ordre de grandeur. Cette courbe enveloppe a la particularité d'augmenter d'environ deux ordres de grandeur dans le premier millimètre de déplacement tangentiel pour, par la suite, se stabiliser rapidement.

2) L'ouverture hydraulique initiale de la fracture varie entre 11 et 39 microns.

3) En comparant l'allure générale des courbes sensiblement similaires de dilatance et de transmissivité intrinsèque, nous observons les différences suivantes:

- Dans les premiers dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel, avant la mobilisation de la dilatance, il y a une petite augmentation de la transmissivité intrinsèque. Si la mise en place est mauvaise, cette augmentation a tendance à changer en diminution.

- La cassure dans la pente la plus forte de la courbe moyenne de dilatance (avec le pic à mi-chemin) se produit à un déplacement tangentiel plus élevé que celle de la courbe moyenne de la transmissivité intrinsèque qui se présente plutôt à proximité du pic.

- À des déplacements tangentiels supérieures à 1 mm, il y a pour l'ensemble des courbes de transmissivité intrinsèque, une stabilisation, ce qui n'est pas le cas pour les courbes de dilatance.

4) En faisant le bilan des observations faites aux différents paliers de contrainte normale, nous pouvons dire que la transmissivité intrinsèque a un comportement similaire qui tend à se différencier avec l'augmentation de la contrainte normale. La direction 90° est celle qui montre la plus forte transmissivité intrinsèque. Cette constatation a aussi été faite lors des essais de la première phase (1995). La direction 270° est celle qui montre la plus faible transmissivité intrinsèque. Les deux autres directions de cisaillement montrent des transmissivités intrinsèques intermédiaires. D'après ces essais, on ne peut prendre pour acquis que la dilatance la plus forte correspond à la transmissivité intrinsèque la plus forte. Donc, il est clair que le comportement de la transmissivité intrinsèque n'est pas proportionnel à la quantité de dilatance d'une fracture.

5) Avec l'augmentation du déplacement tangentiel, l'écart est de plus en plus marqué entre les courbes des transmissivités intrinsèques des différents débits. Cet écart entre les différents débits montre son apparition juste après le pic de cisaillement quand la progression de la transmissivité intrinsèque commence à s'atténuer. Généralement, la transmissivité intrinsèque augmente avec le débit d'injection. Nous remarquons aussi que l'écart entre les différents débits diminue graduellement avec l'augmentation de la contrainte normale de 3 à 9 MPa. On peut expliquer ce phénomène, pour les faibles débits ou lorsque la contrainte normale est faible, par l'incapacité de former une pression suffisante dans la fracture. C'est-à-dire que l'ouverture de la fracture est trop grande pour former une pression significative par rapport au débit injecté.

Les principaux points qui ressortent de l'analyse directionnelle de la récupération sont:

1) L'examen du comportement général des patrons de récupération par secteur des différents essais, permet de noter de nombreuses similitudes. La plupart des patrons débutent (0 mm) en présentant une récupération totale se concentrant dans un ou deux secteurs. Puis, avec le début du déplacement en cisaillement, on remarque une forte variation dans la récupération entre les secteurs (augmentation et diminution brusques des secteurs de récupération. Ce début de variation dans la récupération sectorielle est retardé de quelques dixièmes de millimètre de déplacement tangentiel avec l'accroissement du niveau de contrainte normale. Cette forte variation brusque entre les secteurs se poursuit au-delà du déplacement au pic de résistance au cisaillement. Après le pic de résistance, on remarque une stabilisation graduelle de la récupération dans certains secteurs. Cette stabilisation dans la variation de la récupération des secteurs débute à environ 0.75 mm de déplacement tangentiel pour se terminer par une stabilisation plus complète de 1 à 1.5 mm de déplacement tangentiel. Pour quelques essais à faibles débits (0.25 l/h et 1 l/h) la stabilisation de la récupération dans les secteurs se produit plus difficilement.

2) Le comportement des patrons des pourcentages de récupération par secteur est très similaire à-celui des courbes de transmissivité intrinsèque. Cette observation peut s'appliquer à l'ensemble des essais. Lorsque la transmissivité intrinsèque commence à augmenter (avec le cisaillement) il apparaît des changements brusques dans la récupération par secteur. Ces changements brusques se poursuivent avec la forte augmentation de la

transmissivité intrinsèque. Puis, la transmissivité intrinsèque diminue graduellement pour atteindre une stabilisation. Cette diminution et cette stabilisation correspond parfaitement au comportement de la récupération par secteur.

3) Pour l'ensemble des essais (différentes contraintes normales et différentes directions de cisaillement), dans la phase de stabilisation (1 mm et plus de déplacement tangentiel), il y a développement d'une anisotropie d'écoulement perpendiculairement à la direction de cisaillement. Donc, à partir du pic de cisaillement et du début de la dégradation des aspérités, une anisotropie d'écoulement directionnelle se développe perpendiculairement à la direction de cisaillement. Dépendamment de la morphologie de la fracture, l'anisotropie d'écoulement se développe préférentiellement d'un côté ou d'un autre de la direction perpendiculaire au cisaillement.

Donc un comportement général se dégage par cette étude:

Peu importe si la fracture montre une anisotropie de sa morphologie initiale de surface, l'écoulement est favorisé dans la direction perpendiculaire au cisaillement imposé.

En faisant un retour sur les quelques résultats des études existantes (chapitre 2) afin d'y comparer nos résultats, on remarque:

1) Que l'allure générale de la courbe obtenue par Maini en 1971 ressemble à celles que nous avons obtenues.

- 2) Que la diminution de la perméabilité enregistrée dans les premiers dixièmes de millimètre noté par Gale et al. (1990) est probablement engendrée par une mauvaise mise en place initiale de l'échantillon.
- 3) Que la figure 2,12 de Makurat et al, (1990) montrant la différence entre la transmissivité hydraulique mesurée et calculée est très comparable aux comportements des courbes de dilatance et de transmissivité intrinsèque de nos essais.
- 4) Que la figure 2,16 d'Olson et Brown (1993) montrant le comportement similaire des courbes de dilatance et de transmissivité est en contradiction avec nos résultats et ceux de Makurat et al.(1990).

L'étude de la morphologie des surfaces de la fracture, faite à l'aide des variogrammes moyens des hauteurs des aspérités par direction après cisaillement montre que ce sont les structures des essais dans la direction de cisaillement 270° qui montrent le plus de détérioration. A l'inverse, ce sont les structures des essais dans la direction opposée 90° qui montrent la moins de détérioration.

Le moulage des vides, lors des essais de cisaillement, a permis de voir l'évolution des contacts avec l'augmentation du déplacement tangentiel. En début d'essai, aussitôt que la dilatance se mobilise (avec le déplacement tangentiel) les nombreuses petites zones de contacts aléatoires prennent place graduellement dans les pentes ascendantes des aspérités suivant la direction de cisaillement. De plus, ces points ou zones de contacts s'alignent ou s'amalgament graduellement suivant une direction perpendiculaire au cisaillement. De la

position initiale à la position du pic de cisaillement, les nombreux petits contacts entre les deux épontes évoluent d'une situation aléatoire à une situation de mieux en mieux ordonnée. A partir du pic de cisaillement, la dégradation des aspérités débute. Les zones dégradées en contacts s'allongent et s'unissent suivant la direction perpendiculaire au cisaillement. Ce processus entraîne la formation d'une barrière à l'écoulement dans la direction de cisaillement et la formation de chenaux importants dans les creux entre les alignements des zones dégradées. Avec l'augmentation de la contrainte normale, ce comportement s'amplifie.

B) Acquis expérimentaux

Comme mentionné en introduction, cette étude a une composante importante en développement de nouvelles techniques expérimentales.

- La conception et la fabrication de répliques en mortier très résistantes de bonne qualité;
- la conception et la fabrication d'un système de captage compartimenté;
- la conception et la fabrication d'un système de récupération;
- la conception et la fabrication d'un système d'injection;
- le développement d'une procédure de mise en place des répliques;
- le développement d'un protocole d'essai hydromécanique;
- la conception, la fabrication et la définition d'un protocole d'essai permettant le moulage des vides sous contraintes;

- et finalement, l'adaptation du rugosimètre de laboratoire aux nouvelles répliques nécessaires aux essais hydromécaniques.

C) Recommandations

La réalisation des essais hydromécaniques d'une fracture en cisaillement avec la quantification de l'anisotropie de l'écoulement était l'objectif le plus important de ce projet. Cet objectif a pu être répondu convenablement par le développement de nouvelles techniques expérimentales fiables et l'analyse d'un programme d'essai adéquat. Mais, les résultats obtenus ne sont valables que pour le type de fracture étudiée. Ainsi, il serait recommandé de réaliser d'autres essais avec d'autres types de fractures. Ces nouveaux essais permettront éventuellement d'étendre les résultats que nous avons obtenus à tous les types de fracture et à élaborer, dans un deuxième temps, un modèle réaliste de comportement hydraulique.

Le moulage des vides sous contrainte est une technique très prometteuse. Les premiers résultats qualitatifs de l'évolution des contacts ont été obtenus. Le développement de ce processus pourrait permettre de quantifier et suivre l'évolution des contacts entre les aspérités des deux épontes. Il permettrait aussi de voir la correspondance entre la récupération compartimentée enregistrée et la carte des vides.

Les nombreuses données de profils de la fracture que nous avons recueillies, avant et après cisaillement, ont été traitées afin de caractériser les surfaces et essayer de dresser des parallèles avec l'écoulement. L'analyse de la dégradation des structures à l'aide des variogrammes moyens des hauteurs a permis une meilleure compréhension de l'écoulement. La reconstruction des surfaces des épontes à l'aide du krigeage faite à partir des données des profils, avant cisaillement est excellente, mais pourrait être poussée plus loin en développant une technique mathématique permettant de calculer les vides entre les deux épontes de la fracture reconstruite.

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES

- AMADEI, B. et WIBOWO, J. 1992. Écoulement dans les fractures à surfaces fractales. Structure et Comportement Mécanique des Géomatériaux. Colloque René Houpert, 10-11 septembre 1992, Nancy, pp. 97-107.
- BAKER, W.J. 1955. Flow in fissured formations. Proceedings of Fourth Petroleum Congress, Rome, V, II, pp 379-393.
- BANDIS, S.C., LUMSDEN, A.C., BARTON, N.K. 1983. Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 20, no 6, p. 249-268.
- BARTON, N. 1982. Modelling rock joint behavior from in situ block tests: implications for nuclear waste repository design. Batelle, Office of Nuclear Waste Isolation (ONWI-308), Columbus, OH, 96p.
- BARTON, N. et BANDIS S. 1990. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 4-6 June 1990, (ed). Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 603-610.
- BARTON, N., BANDIS, S. et BAKTAR, K. 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **22**: 121-140.

- BILLAUX, D. et GENTIER, S. 1990. Numerical and laboratory studies of flow in a fracture. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 4-6 June 1990, (ed). Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 369-373.
- CHILES, J.P. 1979. Le variogramme généralisé. Fontainebleau, centre de géostatistique et de morphologie mathématique (ENSMP), rapport inédit N-612, 22p.
- COSTER, M., CHERMANT, J.L. 1983. Recent developments in quantitative fractography. International Metals Reviews, vol. 28, 46p.
- DELHOMME, J.P. 1978. Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Bull. BRGM (deuxième série), section III, no 4, p. 341-375.
- ESAKI, T., HOJO, H., KIMURA, T. et KAMEDA, N. 1991. Expérience simultanée sur la relation cisaillement-perméabilité de joints rocheux. 7th Int. Cong. Rock Mech., pp. 389-392.
- ESAKI, T., NAKAHARA, K., JIANG, Y. et MITANI, Y. 1995. Effects of preceding shear history on shear-flow coupling properties of rock joints. Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmannith (ed.) 1995 Balkema, Rotterdam, pp. 501-506.
- FLAMAND R., ARCHAMBAULT G., GENTIER S., RISS J., ROULEAU A. 1994. An experimental study of the shear behavior of irregular joints based on angularities and progressive degradation of the surfaces. 47^{ème} Conférence Canadienne de Géotechnique. Halifax (23-25 septembre 1994).

- FLAMAND R. 2000. Validation d'un modèle de comportement mécanique pour les fractures rocheuses en cisaillement. Université du Québec à Chicoutimi. 379p.
- GALE, J.E. 1982. The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress - fracture closure - fracture permeability relationships. Proceedings of the 23rd U.S. Rock Mechanics Symposium, Berkeley, California, pp. 290-298.
- GALE, J. E., MacLEOD, R. et LE MESSURIER, P. 1990. Site characterization and validation. Measurement of flowrate, solute velocities and aperture-variation in natural fractures a function of normal and shear stress, stage 3. Technical Report Stripa project 90-11.
- GENTIER, S. 1986. Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture dans le granite sous contrainte normale. Étude expérimentale et théorique. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans. Document du BRGM no. 134, 597p.
- GENTIER, S., BILLAUX, D., VLIET, L. 1988. Laboratory testing of voids of a fracture. A paraître dans Rock Mechanics and Rock Engineering.
- GENTIER, S., PETITJEAN, C., RISS, J., ARCHAMBAULT, G. 1996. Hydromechanical behaviour of a natural joint under shearing. Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium, Balkema, Ed. M. Aubertin, F. Hassani et H. Mitri, Montreal (Canada), 19-21 June 1996, vol. 2, pp 1201-1208.
- GENTIER, S., LAMONTAGNE, E., ARCHAMBAULT, G., RISS, J. 1997. Anisotropy of flow in a fracture undergoing shear and its relationship to the direction of shearing and injection pressure. Int. J. Rock Mech. et Min. Sci., 34 :3-4, Paper No. 258.

- GERVAIS, F. 1989. Methodes d'analyse de la morphologie de fractures. Diplome d'études approfondies. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 328p.
- HAKAMI, E. et BARTON, N. 1990. Aperture measurements and flow experiments using transparent replicas of rock joints. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 4-6 June 1990, (ed). Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 383-390.
- HEIDET, N. 1993. Quelques aspects du comportement hydromecanique d'un massif rocheux. Rapport de stage long SG4, DEUG-B (Option ST), 40p.
- HUITT, J.L. 1956. Fluid flow in simulated fractures. AICHE J., Vol. 2, 259p.
- KANA, D.D., CHOWDHURY, A.H., HSIUNG, S.M., AHDA, M.P., BRADY, B.H.G. 1996. Experimental techniques for dynamic shear testing of natural rock joints.
- LADANYI, B. et ARCHAMBAULT, G. 1970. Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass. Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics, pp. 105-125.
- LOMIZE, G. M. 1951. Flow in fractured rocks (en russe). Gosenergoizdat, Moscou, 127p.
- LOUIS, C. 1969. Étude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leur influence sur la stabilité des massifs rocheux. Thèse Doctorale de l'Université de Karlsruhe, 128p.
- LOUIS, C. 1974. Introduction à l'hydraulique des roches. Bulletin du BRGM, section III, 2ème série, no 4.
- MAINI, Y.N. 1971. In situ hydraulic parameters in jointed rock. Their measurement and interpretation. Ph. D. Thesis Imperial College London, University microfilms, Pen, Bucks (GB).

- MAKURAT, A., BARTON, N., RAD, N. S. et BANDIS, S. 1990. Joint conductivity due to normal and shear deformation. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 4-6 June 1990, (ed). Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 535-540.
- MARSILY, G. 1981. Hydrogéologie quantitative. Masson, Paris, 215 p.
- MURALIDHAR, K. et LONG, J. C. S. 1987. A scheme for calculating flow in fractures using numerical grid generation in three-dimensional domains of complex shapes. Lawrence Berkeley Laboratory report no. 24453, 137p.
- OLSSON, A. W. 1992. The effect of slip on the flow of fluid through a fracture. Geophysical Research Letters, **19**: 541-543.
- OLSSON, W. A. et BROWN, S. R. 1993. Hydromechanical Response of a Fracture Undergoing Compression and Shear. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., **30**: 845-851.
- PARRISH, D.R. 1963. Fluid flow in rough fractures. Proceedings SPE-AIME, Proc. Res. Symp., Norman, Okla, 1963, April 29-30, SPE 563, 9p.
- PATTON, F.D. 1966. Multiple modes of shear failure in rock and related materials. Ph D. Thesis, University Illinois, 282p.
- PETITJEAN, C. 1994. Comportement hydromécanique d'une fracture en cisaillement. Mise au point d'un dispositif et définition d'un protocole d'essai. Diplôme d'Études Approfondies. École Centrale de Paris, 110p.

- PYRAK-NOLTE, J., MEYER, L.R., COOK, N.G.W., WITHERSPOON, P.A. 1987. Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock. Sixth International Congress on Mechanics, Montreal, Canada, pp. 225-231.
- RAVEN, K. G. et GALE, J. E. 1985. Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **22**: 251-261.
- ROMM, E.S. 1966. Flow characteristics of fractured rocks. Nedra, Moscou, 283p.
- SHARP, J. C. et MAINI, T. 1972. Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joint rock. *Proc. Symp. Percolation through fissured rock*, Stuttgart.
- TEUFEL, W.L. 1987. Permeability changes during shear deformation of fractured rock. 28th US Symposium on Rock Mechanics, Tucson, 29 June-1 July 1987, pp. 473-480.
- TSANG, Y. W. et WITHERSPOON, P. A. 1983. The dependence of fracture mechanical and fluid flow properties on fracture roughness and sample size. *J. of Geophys. Res.* **88**: 2359-2366.
- VERREAULT, N. 1997. Analyse morphologique d'une fracture. Rapport de stage de coopération franco-québécoise CDGA. Université de Bordeaux I.
- YEO, I. W. 1997. Anisotropic hydraulic properties of a rock fracture under normal and shear loading. University of London. 228p.

ANNEXE 1

CARACTÉRISATION DU MATÉRIAU D'ÉTUDE

ANNEXE 1

CARACTÉRISATION DU MATÉRIAU D'ÉTUDE

A1.1 Granulométrie du mortier

Une granulométrie a été faite pour chacune des deux phases du projet. Chaque phase représente un achat de mortier provenant d'un lot différent chez le détaillant. D'après les résultats obtenus (figure A1.1), les granulométries pour les deux années représentant les deux phases de l'étude sont très similaires. Cependant, nous n'avons aucune information des fines (42%) passant le tamis 0.08 mm. La plupart des grains ne passant pas le tamis 0.08 mm se retrouvent dans l'intervalle 0.4 à 2 mm.

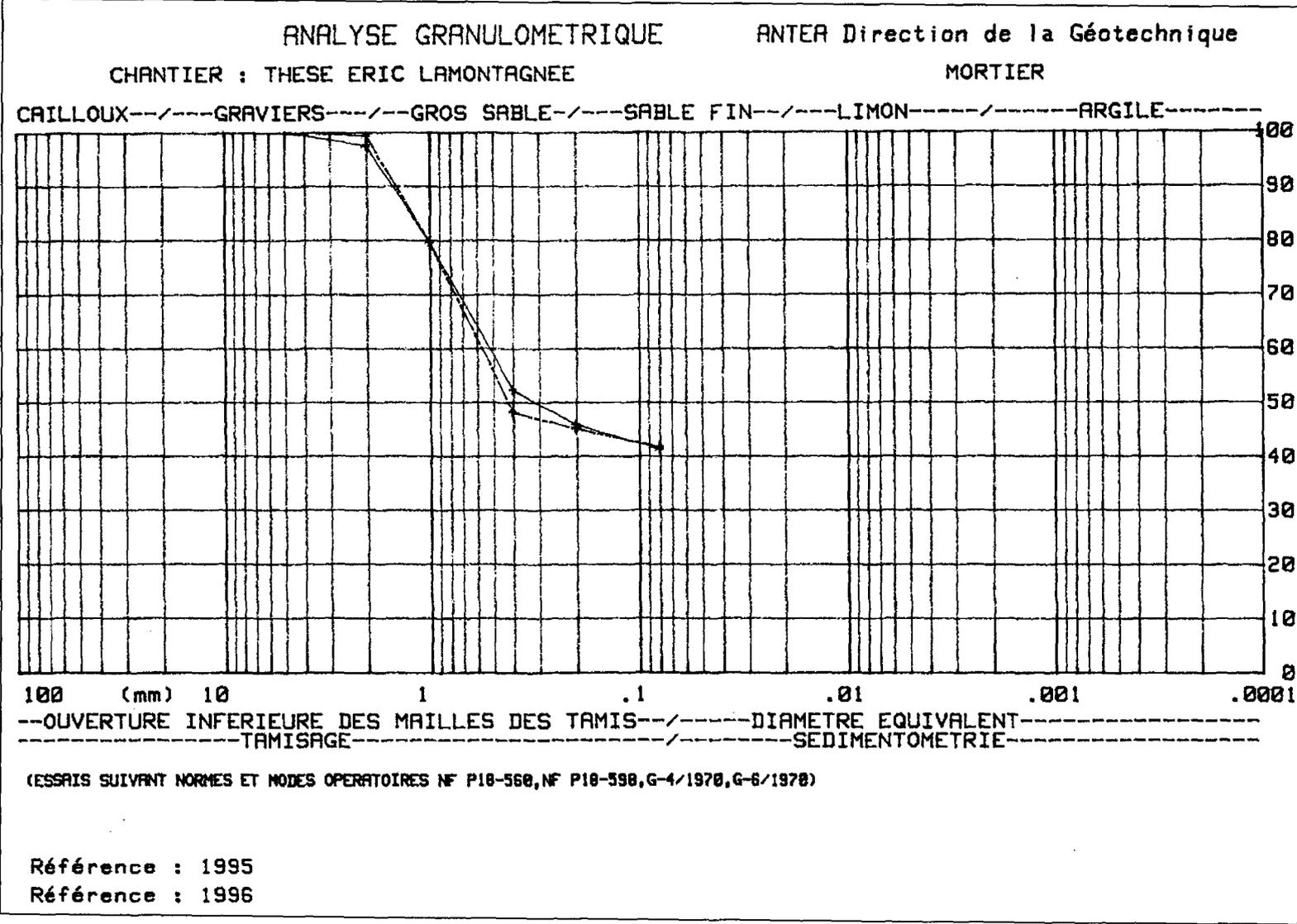


Figure A1.1 Courbe granulométrique

A1.2 Fabrication et préparation des éprouvettes témoins

Afin de caractériser le mortier utilisé dans la fabrication des répliques, nous avons réalisé, pour chaque coulage de paire de réplique (grise et rose), des éprouvettes témoins (naturel, avec colorant rose, avec colorant gris). Le support utilisé pour la réalisation de ces éprouvettes a été un tube en PVC de 6 centimètres de diamètre.

Une fois la période de durcissement terminée (minimum 30 jours pour ce mortier), les éprouvettes témoins ont été préparées de la façon suivante: 1) démoulage des carottes de mortier à partir des tubes en PVC, 2) coupe et rectification afin d'avoir des éprouvettes avec des rapports d'élançement de 2 (la longueur des carottes est égale à deux fois le diamètre) et un parallélisme parfait entre les deux surfaces.

A1.3 Caractérisation par tests

Les tests effectués sur ces éprouvettes témoin, pour caractériser le mortier, sont 1) les vitesses du son longitudinales et transversales, 2) la résistance en compression uniaxiale, 3) la déformabilité et 4) la perméabilité. Avant d'effectuer ces tests sur les échantillons témoins, nous avons mesuré leurs hauteurs, diamètres, et volumes (voir tableau A1.1). La mesure du volume a été faite à partir des poids de l'échantillon à l'air libre et immergé dans l'eau. La mesure de la hauteur et du diamètre de chaque échantillon a été obtenue à partir de la moyenne de deux mesures perpendiculaires.

Tableau A1.1: Caractéristiques des éprouvettes témoins pour le mortier traffix 95

Date 1995	Éprouvettes sans colorant					Éprouvettes avec colorant rose					Éprouvettes avec colorant gris				
	Haut. mm.	Diam. mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm ³	Haut. mm.	Diam. mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm ³	Haut. mm.	Diam. mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm ³
-31- Jul.	114.4	56.7	626.22	341.57	284.65	113.8	56.7	620.46	336.92	283.54	114.1	56.7	617.57	334.02	283.55
-1- Aug.	114.1	56.6	630.55	345.74	284.81	113.8	56.7	625.38	340.35	285.03	113.5	56.7	621.97	338.58	283.39
-2- Aug.	114.2	56.6	627.22	342.59	284.63	113.7	56.5	622.99	338.96	284.03	113.4	56.6	621.69	338.66	283.03
-3- Aug.	113.6	56.7	622.82	339.16	283.66	114	56.6	622.24	338.18	284.06	114.5	56.6	630.84	345.68	285.16
-7- Aug.	114	56.6	623.31	339.59	283.72	114.2	56.6	630.3	345.29	285.01	113.8	56.6	625.83	342.14	283.69
-8- Aug.	113.4	56.7	623.4	339.77	283.63	114.1	56.6	626.3	341.29	285.01	113.9	56.7	624.89	341.27	283.62
-10- Aug.	113.8	56.6	625.18	340.93	284.25	113.8	56.8	627.44	341.98	285.46	113.9	56.7	625.43	340.94	284.49
-21- Aug.	114.1	56.6	622.94	338.68	284.26	114.2	56.9	624.1	338.31	285.79	113.9	56.8	626.75	342.21	284.54
-22- Aug.	113.6	56.6	621.39	338.46	282.93	114.1	56.6	623.44	338.86	284.58	113.7	56.6	622.03	338.77	283.26
-23- Aug.	113.7	56.6	623.15	339.26	283.89	113.5	56.7	618.15	335.59	282.56	113.6	56.7	621.39	337.93	283.46

Tableau A1.1: Caractéristiques des éprouvettes témoins pour le mortier traffix 96

Date 1996	Éprouvettes sans colorant					Éprouvettes avec colorant rose					Éprouvettes avec colorant gris				
	Haut. mm.	Diam. mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm	Haut. mm.	Diam. mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm	Haut. mm.	Diam. mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm
12-juin	113,5	56,9	625,73	341,46	284,27	113,5	56,8	627,42	343,53	283,89	112,7	56,4	618,28	338,75	279,53
13-juin	113,3	56,6	625,8	342,28	283,52	113,6	56,8	633,07	348,22	284,85	113,5	56,5	623,99	342,69	281,3
17-juin	113,5	56,7	631,59	346,76	284,83	113,4	56,6	632,16	347,59	284,57	113,2	56,8	628,58	344,95	283,63
20-juin	113,4	56,1	617,56	337,03	280,53	113,6	56	623,29	342,14	281,15	113,6	56,2	619,91	339,85	280,06
27-juin	113,5	56,7	626,47	342,01	284,46	113,5	56,2	621,2	340,74	280,46	113,7	56,6	621,91	341,04	280,87
01-juil	113,3	56,4	613,69	332,99	280,7	113,5	56,1	620,27	340,21	280,06	113,7	56,3	618,86	339,47	279,39
02-juil	113,5	56	618,33	337,66	280,67	113,4	56,4	621,59	341,66	279,93	113,4	56,4	621,81	341,93	279,88
03-juil	113,4	56,6	613,3	333,16	280,14	113,3	56,4	620,39	340,26	280,13	113,5	56,5	619,1	339,34	279,76
04-juil	113,5	56	617,16	336,99	280,17	113,3	56,1	621,58	341,21	280,37	113,5	56,4	621,85	341,1	280,75
08-juil	113,4	56,1	616,32	335,36	280,96	113,3	56,2	619,56	341,02	278,54	113,6	56,5	620,04	340,68	279,36

Tableau A1.1: Caractéristiques des éprouvettes témoins pour le mortier traffix 96 (suite...)

Date	Éprouvettes sans colorant					Éprouvettes avec colorant rose					Éprouvettes avec colorant gris				
	Haut. mm.	Diam mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm	Haut. mm.	Diam mm.	Pair g.	Peau g.	Volum e cm	Haut. mm.	Diam mm.	Pair g.	Peau g.	Volume cm
09-juil	113	56,6	608,23	330,58	277,65	113,4	56,3	618,12	338,92	279,2	113,5	56,2	620,02	340,97	279,05
10-juil	113,6	56,4	612,91	333,63	279,28	113,6	55,8	618,01	338,26	279,75	113,3	56,1	620,1	340,23	279,87
11-juil	112,6	55,8	618,2	338,24	279,96	113,4	56	616,07	336,87	279,2	113,6	56,3	625,35	344,08	281,27
15-juil	113,6	56,2	614,98	333,88	281,1	113,6	57	621,89	340,38	281,51	113,7	56,3	617,23	337,86	279,37
16-juil	113,3	55,6	615,19	338,8	276,39	113,6	55,9	619,41	339,65	279,76	113,4	56,7		341,61	
17-juil	113,4	56,6	616,22	346,5	269,72	113	56,5	612,99	335,92	277,07	113,6	56,6	617,66	338,61	279,05
18-juil	113,4	56,3	614,18	333,18	281	113,4	56,5	619,03	339,97	279,06	113,4	56,9	617,61	337,63	279,98
22-juil	113,3	55,8	611,21	332,41	278,8	113,5	55,8	616,3	337,25	279,05	113,6	56,2	619,26	339,54	279,72
23-juil	113,2	55,9	609,93	331,72	278,21	113,5	56,1	616,36	336,64	279,72	113,2	55,8	616,9	337,45	279,45
24-juil	113,3	56,3	607,85	329,14	278,71	113,3	56,6	609,86	331,52	278,34	113,3	57,1	617,25	335,79	281,46

Caractérisation mécanique

A1.3.1 Mesure de la vitesse du son

Une pastille piézo-électrique, placée à une extrémité de l'éprouvette de mortier, est excitée par un générateur d'impulsions électriques. Sous cette excitation, la pastille émet alors des ondes mécaniques qui se propagent au sein du matériau ausculté. A l'autre extrémité de l'éprouvette, un récepteur transforme les ondes mécaniques captées en signaux électriques visualisés sur le tube cathodique d'un oscilloscope (photo A1.1). La base de temps de l'oscilloscope permet la mesure directe du temps de parcours des ondes au sein du matériau. Pour les deux tests, le principe est le même, soit la mesure du temps que prend une onde (longitudinale ou transversale) pour parcourir la distance entre un émetteur et un récepteur.

On recueille, à l'aide d'un oscilloscope, une lecture en microseconde à laquelle il faut retrancher une certaine constante (aussi en microseconde) afin de n'avoir que le temps de parcours de l'onde dans l'éprouvette témoin. Prenant en compte la hauteur des échantillons en centimètres, on peut calculer les vitesses du son longitudinales (VL) et transversales (VT) à l'aide de la formule suivante:

$$VL \text{ ou } VT \text{ (m/s)} = \text{Hauteur (cm)} \times 10^4 / \text{Temps (us)}$$

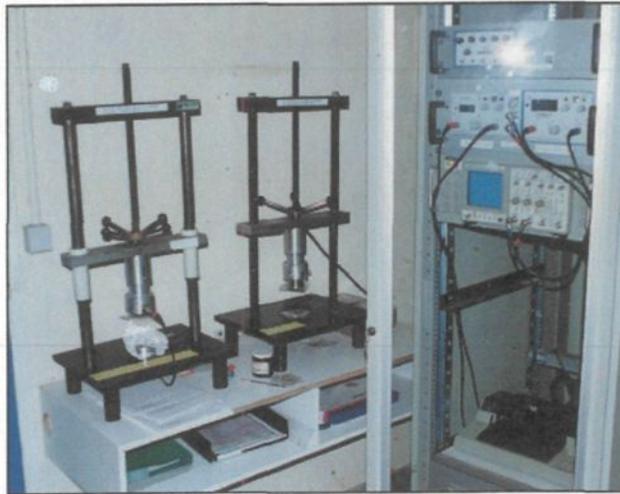


Photo A1.1: Montage pour les mesures de vitesses du son

Pour les échantillons fabriqués en 1995 et 1996, les vitesses du son obtenues pour les échantillons témoins sont présentées dans le tableau A1.2 (ondes longitudinales) et A1.3 (ondes transversales). Les vitesses moyennes du son pour les ondes longitudinales sont de 3822 m/s (1995) et 3943 m/s (1996). Celles pour les ondes transversales sont de 2280 m/s (1995) et 2277 m/s (1996). Les moyennes pour les vitesses longitudinales du son des témoins de mortier traffix sont de 3835 m/s (1995), 3907 m/s (1996) (pour les éprouvettes naturelles), 3812 m/s (1995), 3983 m/s (1996) (pour celles de teintes roses) et 3819 m/s (1995), 3938 m/s (1996) (pour celles de teintes grises). Les moyennes pour les vitesses transversales du son des témoins de mortier traffix sont de 2301 m/s (1995), 2279 m/s (1996) (pour les éprouvettes naturelles), 2265 m/s (1995), 2271 m/s (1996) (pour celles de teintes roses) et 2273 m/s (1995), 2282 m/s (1996) (pour celles de teintes grises).

Tableau A1.2: Mesure de la vitesse des ondes longitudinales

Témoins de mortier traffix 95 naturels

Date de fabrication	Lecture (A) (us)	Constante (C) (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VL) (m/s)
31-juil	31,30	1,73	29,57	11,44	3868,79
01-août	31,80	1,73	30,07	11,41	3794,48
02-août	30,80	1,73	29,07	11,42	3928,45
03-août	31,50	1,73	29,77	11,36	3815,92
07-août	31,40	1,73	29,67	11,40	3842,26
08-août	31,05	1,73	29,32	11,34	3867,67
10-août	31,60	1,73	29,87	11,38	3809,84
21-août	31,75	1,73	30,02	11,41	3800,80
22-août	31,60	1,73	29,87	11,36	3803,15
23-août	31,50	1,73	29,77	11,37	3819,28
Moyenne:					3835,06

Témoins de mortier traffix 96 naturels

Date de fabrication	Lecture (A) (us)	Constante (C) (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VL) (m/s)
12-juin	30,4	1,73	28,67	11,345	3957,10
13-juin	30	1,73	28,27	11,33	4007,78
17-juin	31	1,73	29,27	11,35	3877,69
20-juin	30,7	1,73	28,97	11,335	3912,67
27-juin	30,15	1,73	28,42	11,345	3991,91
01-juil	30,1	1,73	28,37	11,33	3993,66
02-juil	30,4	1,73	28,67	11,35	3958,84
03-juil	30,6	1,73	28,87	11,34	3927,95
04-juil	32	1,73	30,27	11,35	3749,59
08-juil	31,2	1,73	29,47	11,34	3847,98
09-juil	30,6	1,73	28,87	11,295	3912,37
10-juil	30,9	1,73	29,17	11,355	3892,70
11-juil	29,65	1,73	27,92	11,26	4032,95
15-juil	31,5	1,73	29,77	11,36	3815,92
16-juil	30,6	1,73	28,87	11,33	3924,49
17-juil	30,5	1,73	28,77	11,34	3941,61
18-juil	32,2	1,73	30,47	11,335	3720,05
22-juil	30,2	1,73	28,47	11,325	3977,87
23-juil	31,15	1,73	29,42	11,32	3847,72
24-juil	31,2	1,73	29,47	11,33	3844,59
Moyenne:					3906,73

Témoins de mortier traffix 95 de couleurs roses

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VL) (m/s)
31-juil	31,00	1,73	29,27	11,38	3887,94
01-août	31,25	1,73	29,52	11,38	3855,01
02-août	31,50	1,73	29,77	11,37	3819,28
03-août	32,00	1,73	30,27	11,40	3766,11
07-août	31,25	1,73	29,52	11,42	3868,56
08-août	31,70	1,73	29,97	11,41	3807,14
10-août	31,85	1,73	30,12	11,38	3778,22
21-août	32,20	1,73	30,47	11,42	3747,95
22-août	31,70	1,73	29,97	11,41	3807,14
23-août	31,75	1,73	30,02	11,35	3780,81
Moyenne:					3811,82

Témoins de mortier traffix 96 de couleurs roses

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VL) (m/s)
12-juin	29,5	1,73	27,77	11,35	4085,34
13-juin	29,9	1,73	28,17	11,36	4030,88
17-juin	29,9	1,73	28,17	11,34	4023,78
20-juin	29,85	1,73	28,12	11,36	4039,83
27-juin	30,5	1,73	28,77	11,35	3945,08
01-juil	30	1,73	28,27	11,35	4015,92
02-juil	30	1,73	28,27	11,34	4009,55
03-juil	29,85	1,73	28,12	11,33	4027,38
04-juil	30,5	1,73	28,77	11,33	3938,13
08-juil	30	1,73	28,27	11,33	4006,01
09-juil	30,05	1,73	28,32	11,34	4004,24
10-juil	30,6	1,73	28,87	11,355	3933,15
11-juil	29,6	1,73	27,87	11,34	4068,89
15-juil	30,6	1,73	28,87	11,36	3934,88
16-juil	30,3	1,73	28,57	11,355	3974,45
17-juil	30	1,73	28,27	11,3	3997,17
18-juil	30,8	1,73	29,07	11,335	3899,21
22-juil	31,2	1,73	29,47	11,345	3849,68
23-juil	30,3	1,73	28,57	11,35	3972,70
24-juil	30,7	1,73	28,97	11,333	3911,98
Moyenne:					3983,46

Témoins de mortier traffix 95 de couleurs gris

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VL) (m/s)
31-juil	31,00	1,73	29,27	11,41	3898,19
01-août	30,70	1,73	28,97	11,35	3917,85
02-août	31,80	1,73	30,07	11,34	3771,20
03-août	32,90	1,73	31,17	11,45	3673,40
07-août	31,50	1,73	29,77	11,38	3822,64
08-août	31,40	1,73	29,67	11,39	3838,89
10-août	31,00	1,73	29,27	11,39	3891,36
21-août	31,65	1,73	29,92	11,39	3806,82
22-août	31,60	1,73	29,87	11,37	3806,49
23-août	31,90	1,73	30,17	11,36	3765,33
Moyenne:					3819,22

Témoins de mortier traffix 96 de couleurs gris

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VL) (m/s)
12-juin	29,25	1,73	27,52	11,27	4093,39
13-juin	29,7	1,73	27,97	11,35	4057,92
17-juin	29,3	1,73	27,57	11,32	4105,91
20-juin	29,8	1,73	28,07	11,36	4047,03
27-juin	29,85	1,73	28,12	11,37	4041,61
01-juil	30,4	1,73	28,67	11,37	3964,07
02-juil	31,8	1,73	30,07	11,34	3771,20
03-juil	30,6	1,73	28,87	11,35	3929,68
04-juil	30,1	1,73	28,37	11,35	3998,94
08-juil	29,9	1,73	28,17	11,36	4032,66
09-juil	30,8	1,73	29,07	11,35	3904,37
10-juil	30	1,73	28,27	11,325	4006,01
11-juil	33,4	1,73	31,67	11,36	3586,99
15-juil	33,3	1,73	31,57	11,37	3601,52
16-juil	30,3	1,73	28,57	11,34	3969,20
17-juil	30,6	1,73	28,87	11,355	3933,15
18-juil	30,7	1,73	28,97	11,34	3914,39
22-juil	30,9	1,73	29,17	11,355	3892,70
23-juil	30,15	1,73	28,42	11,315	3981,35
24-juil	30,6	1,73	28,87	11,33	3924,49
Moyenne:					3937,82

Tableau A1.3: Mesure de la vitesse des ondes transversales

Témoins de mortier traffix 95 naturels

Date de fabrication	Lecture (A) (us)	Constante (C) (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VT) (m/s)
31-juil	52,60	3,20	49,40	11,44	2315,79
01-août	52,30	3,20	49,10	11,41	2323,83
02-août	53,00	3,20	49,80	11,42	2293,17
03-août	53,40	3,20	50,20	11,36	2262,95
07-août	52,40	3,20	49,20	11,40	2317,07
08-août	51,20	3,20	48,00	11,34	2362,50
10-août	52,10	3,20	48,90	11,38	2327,20
21-août	53,80	3,20	50,60	11,41	2254,94
22-août	53,50	3,20	50,30	11,36	2258,45
23-août	52,80	3,20	49,60	11,37	2292,34
Moyenne:					2300,82

Témoins de mortier traffix 96 naturels

Date de fabrication	Lecture (A) (us)	Constante (C) (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VT) (m/s)
12-juin	53,5	3,20	50,30	11,35	2255,47
13-juin	52,2	3,20	49,00	11,33	2312,24
17-juin	53	3,20	49,80	11,35	2279,12
20-juin	53,2	3,20	50,00	11,34	2267,00
27-juin	52,55	3,20	49,35	11,35	2298,89
01-juil	53,1	3,20	49,90	11,33	2270,54
02-juil	52,2	3,20	49,00	11,35	2316,33
03-juil	53,35	3,20	50,15	11,34	2261,22
04-juil	52,1	3,20	48,90	11,35	2321,06
08-juil	53	3,20	49,80	11,34	2277,11
09-juil	52,45	3,20	49,25	11,295	2293,40
10-juil	53,5	3,20	50,30	11,355	2257,46
11-juil	51,85	3,20	48,65	11,26	2314,49
15-juil	53,4	3,20	50,20	11,36	2262,95
16-juil	52,8	3,20	49,60	11,33	2284,27
17-juil	53,3	3,20	50,10	11,34	2263,47
18-juil	53,3	3,20	50,10	11,335	2262,48
22-juil	53,25	3,20	50,05	11,325	2262,74
23-juil	53	3,20	49,80	11,32	2273,09
24-juil	53,5	3,20	50,30	11,33	2252,49
Moyenne:					2279,23

Témoins de mortier traffix 95 de couleurs roses

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VT) (m/s)
31-juil	54,10	3,20	50,90	11,38	2235,76
01-août	52,90	3,20	49,70	11,38	2289,74
02-août	53,90	3,20	50,70	11,37	2242,60
03-août	53,70	3,20	50,50	11,40	2257,43
07-août	53,20	3,20	50,00	11,42	2284,00
08-août	53,60	3,20	50,40	11,41	2263,89
10-août	52,60	3,20	49,40	11,38	2303,64
21-août	54,00	3,20	50,80	11,42	2248,03
22-août	53,70	3,20	50,50	11,41	2259,41
23-août	53,20	3,20	50,00	11,35	2270,00
Moyenne:					2265,45

Témoins de mortier traffix 96 de couleurs roses

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VT) (m/s)
12-juin	53,3	3,20	50,10	11,35	2264,47
13-juin	52,35	3,20	49,15	11,36	2310,27
17-juin	53,1	3,20	49,90	11,34	2271,54
20-juin	53,1	3,20	49,90	11,36	2276,55
27-juin	52,9	3,20	49,70	11,35	2283,70
01-juil	53	3,20	49,80	11,35	2279,72
02-juil	52,5	3,20	49,30	11,34	2299,19
03-juil	53	3,20	49,80	11,33	2274,10
04-juil	53,7	3,20	50,50	11,33	2243,56
08-juil	53,3	3,20	50,10	11,33	2260,48
09-juil	53,2	3,20	50,00	11,34	2268,00
10-juil	53,2	3,20	50,00	11,355	2271,00
11-juil	53,7	3,20	50,50	11,34	2245,54
15-juil	53	3,20	49,80	11,36	2281,12
16-juil	52,5	3,20	49,30	11,355	2303,25
17-juil	53,1	3,20	49,90	11,3	2264,53
18-juil	53,1	3,20	49,90	11,335	2271,54
22-juil	53,5	3,20	50,30	11,345	2255,47
23-juil	53,6	3,20	50,40	11,35	2251,98
24-juil	53,9	3,20	50,70	11,333	2235,31
Moyenne:					2270,56

Témoins de mortier traffix 95 de couleurs gris

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VT) (m/s)
31-juil	54,00	3,20	50,80	11,41	2246,06
01-août	53,80	3,20	50,60	11,35	2243,08
02-août	52,30	3,20	49,10	11,34	2309,57
03-août	53,10	3,20	49,90	11,45	2294,59
07-août	52,80	3,20	49,60	11,38	2294,35
08-août	54,00	3,20	50,80	11,39	2242,13
10-août	53,30	3,20	50,10	11,39	2273,45
21-août	52,70	3,20	49,50	11,39	2301,01
22-août	53,70	3,20	50,50	11,37	2251,49
23-août	53,20	3,20	50,00	11,36	2272,00
Moyenne:					2272,77

Témoins de mortier traffix 96 de couleurs gris

Date de fabrication	Lecture (us)	Constante (us)	Temps A-C (us)	Hauteur (cm)	Vitesse (VT) (m/s)
12-juin	52,5	3,20	49,30	11,27	2284,99
13-juin	52,55	3,20	49,35	11,35	2299,90
17-juin	52,1	3,20	48,90	11,32	2314,93
20-juin	53,1	3,20	49,90	11,36	2276,55
27-juin	53,3	3,20	50,10	11,37	2268,46
01-juil	53	3,20	49,80	11,37	2282,13
02-juil	53,1	3,20	49,90	11,34	2272,55
03-juil	53,7	3,20	50,50	11,35	2246,53
04-juil	52,5	3,20	49,30	11,35	2301,22
08-juil	53	3,20	49,80	11,36	2281,12
09-juil	52,8	3,20	49,60	11,35	2288,31
10-juil	52,1	3,20	48,90	11,325	2315,95
11-juil	53,5	3,20	50,30	11,36	2258,45
15-juil	53,5	3,20	50,30	11,37	2260,44
16-juil	53	3,20	49,80	11,34	2277,11
17-juil	53,4	3,20	50,20	11,355	2261,95
18-juil	53	3,20	49,80	11,34	2277,11
22-juil	53,3	3,20	50,10	11,355	2266,47
23-juil	52	3,20	48,80	11,315	2318,65
24-juil	52,9	3,20	49,70	11,33	2279,68
Moyenne:					2281,64

A1.3.2 La compression uniaxiale

Le test de la résistance en compression uniaxiale consiste à appliquer à une éprouvette cylindrique une force axiale croissant jusqu'à la rupture de l'échantillon (photo A1.2). Ce test a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique Walter + Baiag de capacité 2000 KN avec armoire de commande électronique. La vitesse choisie pour le chargement est de 5 bars par minute (même que celle de Rock Flamand 2000). Certaines valeurs de RC ont été obtenues à partir des tests de déformabilité décrits un peu plus loin.

Pour les échantillons fabriqués en 1995, le tableau A1.4 montre les rapports d'élanement et les RC obtenus pour chaque éprouvette témoin. Le tableau A1.5 montre les moyennes de RC pour un même coulage (date de fabrication) et celles avec ou sans colorant (naturel, rose et gris). L'état naturel veut dire sans colorant, alors que l'état rose et gris veut dire avec les colorants rose et gris. D'après ce tableau, nous pouvons constater que l'ajout de colorants dans la fabrication du mortier semble diminuer quelque peu (50 bars) sa résistance en compression uniaxiale. La moyenne des résultats de RC sur tous les échantillons témoins (87.49 Mpa) est un peu plus élevée que celle donnée par le fabricant de mortier (80 Mpa).



Photo A1.2 : Test de compression uniaxiale

Tableau A1.4: RC et rapports d'élanement pour les témoins du mortier traffix 95

Témoins Date de fabrication	Naturel				Rose				Gris			
	Hauteur	Diamètre	H/D	RC	Hauteur	Diamètre	H/D	RC	Hauteur	Diamètre	H/D	RC
	(mm)	(mm)		Mpa	(mm)	(mm)		Mpa	(mm)	(mm)		Mpa
31-juil	114,4	56,7	2,02	85,0	113,8	56,7	2,01	78,3	114,1	56,7	2,01	85,7
01-août	114,1	56,6	2,02	98,6	113,8	56,7	2,01	91,6	113,5	56,7	2,00	76,2
02-août	114,2	56,6	2,02	97,3	113,7	56,5	2,01	84,4	113,4	56,6	2,00	93,4
03-août	113,6	56,7	2,00	93,3	114,0	56,6	2,01	85,6	114,5	56,6	2,02	85,2
07-août	114,0	56,6	2,01	92,8	114,2	56,6	2,02	88,6	113,8	56,6	2,01	90,9
08-août	113,4	56,7	2,00	95,4	114,1	56,6	2,02	86,1	113,9	56,7	2,01	82,5
10-août	113,8	56,6	2,01	92,1	113,8	56,8	2,00	85,9	113,9	56,7	2,01	85,6
21-août	114,1	56,6	2,02	80,4	114,2	56,9	2,01	86,1	113,9	56,8	2,01	94,4
22-août	113,6	56,6	2,01	88,8	114,1	56,6	2,02	84,5	113,7	56,6	2,01	81,4
23-août	113,7	56,6	2,01	92,3	113,5	56,7	2,00	80,8	113,6	56,7	2,00	81,3

Tableau A1.5: RC pour les témoins du mortier traffix 95

Témoins Date de fabrication	Naturel RC Mpa	Rose RC Mpa	Gris RC Mpa	Moy.
31-juil	85,03	78,30	85,66	83,00
01-août	98,61	91,64	76,20	88,82
02-août	97,29	84,44	93,36	91,70
03-août	93,31	85,57	85,21	88,03
07-août	92,84	88,60	90,90	90,78
08-août	95,45	86,10	82,50	88,02
10-août	92,09	85,90	85,60	87,86
21-août	80,36	86,12	94,40	86,96
22-août	88,79	84,50	81,40	84,90
23-août	92,29	80,80	81,30	84,80
Moy.	91,61	85,20	85,65	87,49 Moy. tot.

Pour les échantillons fabriqués en 1996, le tableau A1.6 montre les rapports d'élanement et les RC obtenus pour chaque éprouvette témoin. Le tableau A1.7 montre les moyennes de RC pour un même coulage (date de fabrication) et celles avec ou sans

colorant (naturel, rose et gris). D'après ce tableau, nous pouvons constater que l'ajout de colorant dans la fabrication du mortier semble diminuer quelque peu (25 bars) sa résistance en compression uniaxiale. La moyenne des résultats de RC sur tous les échantillons témoin (74,3 Mpa) est un peu en-dessous de celle donnée par le fabricant de mortier (80 Mpa).

Tableau A1.6: RC et rapports d'élancements pour les témoins du mortier traffix 96

Témoins Date de fabrication	Naturel					Rose					Gris				
	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	H/D	Force (kN)	RC Mpa	Hauteur r (mm)	Diamètre (mm)	H/D	Force (kN)	RC Mpa	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	H/D	Force (kN)	RC Mpa
12-juin	113,45	56,85	2,00	169,2	66,7	113,45	56,8	2,00	187,5	74,0	112,65	56,35	2,00	209,3	83,9
13-juin	113,3	56,6	2,00	198,7	79,0	113,55	56,8	2,00	178,2	70,3	113,5	56,48	2,01	173,5	69,3
17-juin	113,5	56,7	2,00	190	75,2	113,35	56,6	2,00	197,8	78,6	113,2	56,8	1,99	175,9	69,4
20-juin	113,35	56,1	2,02	203,8	82,4	113,6	56	2,03	154,2	62,6	113,6	56,15	2,02	182,5	73,7
27-juin	113,45	56,7	2,00	216,4	85,7	113,5	56,15	2,02	165,7	66,9	113,65	56,55	2,01	208,8	83,1
01-juil	113,3	56,4	2,01	207,2	82,9	113,53	56,1	2,02	221,2	89,5	113,65	56,3	2,02	163,3	65,6
02-juil	113,5	56	2,03	216,4	87,9	113,35	56,4	2,01	182,0	72,8	113,4	56,35	2,01	204,4	82,0
03-juil	113,4	56,55	2,01	209,3	83,3	113,25	56,4	2,01	182,2	72,9	113,45	56,5	2,01	181,8	72,5
04-juil	113,5	56	2,03	188,4	76,5	113,3	56,1	2,02	171,2	69,3	113,45	56,35	2,01	213,6	85,6
08-juil	113,4	56,1	2,02	169,5	68,6	113,25	56,15	2,02	178,4	72,0	113,6	56,5	2,01	214,4	85,5
09-juil	112,95	56,6	2,00	203,7	81,0	113,4	56,25	2,02	217,6	87,6	113,5	56,15	2,02	186,3	75,2
10-juil	113,55	56,35	2,02	202,8	81,3	113,55	55,8	2,03	178,2	72,9	113,25	56,13	2,02	160,6	64,9
11-juil	112,6	55,8	2,02	180,8	73,9	113,4	56	2,03	179,8	73,0	113,6	56,3	2,02	191,7	77,0
15-juil	113,6	56,2	2,02	186,9	75,3	113,6	57	1,99	152,3	59,7	113,7	56,25	2,02	189,4	76,2
16-juil	113,3	55,58	2,04	180,1	74,2	113,55	55,9	2,03	182,9	74,5	113,4	56,7	2,00	154,8	61,3
17-juil	113,4	56,6	2,00	194,9	77,5	113	56,5	2,00	151,3	60,3	113,55	56,55	2,01	180,1	71,7
18-juil	113,35	56,3	2,01	174,7	70,2	113,35	56,45	2,01	194,8	77,8	113,4	56,85	1,99	201,0	79,2
22-juil	113,25	55,8	2,03	191,8	78,4	113,45	55,75	2,03	136,0	55,7	113,55	56,2	2,02	191,3	77,1
23-juil	113,2	55,85	2,03	186	75,9	113,5	56,08	2,02	161,6	65,4	113,15	55,8	2,03	180,5	73,8
24-juil	113,3	56,3	2,01	166,7	67,0	113,33	56,6	2,00	169,9	67,5	113,3	57,1	1,98	166,8	65,2

Tableau A1.7: RC pour les témoins du mortier traffix 96

Témoins 1996	Naturel	Rose	Gris	
Date de fabrication	RC Mpa	RC Mpa	RC Mpa	Moy.
12-juin	66,7	74,0	83,9	74,9
13-juin	79,0	70,3	69,3	72,8
17-juin	75,2	78,6	69,4	74,4
20-juin	82,4	62,6	73,7	72,9
27-juin	85,7	66,9	83,1	78,6
01-juil	82,9	89,5	65,6	79,3
02-juil	87,9	72,8	82,0	80,9
03-juil	83,3	72,9	72,5	76,3
04-juil	76,5	69,3	85,6	77,1
08-juil	68,6	72,0	85,5	75,4
09-juil	81,0	87,6	75,2	81,3
10-juil	81,3	72,9	64,9	73,0
11-juil	73,9	73,0	77,0	74,6
15-juil	75,3	59,7	76,2	70,4
16-juil	74,2	74,5	61,3	70,0
17-juil	77,5	60,3	71,7	69,8
18-juil	70,2	77,8	79,2	75,7
22-juil	78,4	55,7	77,1	70,4
23-juil	75,9	65,4	73,8	71,7
24-juil	67,0	67,5	65,2	66,5
Moyenne	77,1	71,2	74,6	74,3

A1.3.3 Test de déformabilité monoaxiale

Des essais de déformabilité monoaxiale ont été effectués sur quelques échantillons témoins représentant des répliques de 1995-96. Quatre jauges de déformations de type KFC-10-C1-11 (facteur de jauge: 2.12) furent collées sur les échantillons témoins (deux en position longitudinale et deux en position transversale). Les tests de déformabilité furent effectués avec la même presse que pour les RC et avec la même vitesse de chargement (photo A1.3). Les valeurs moyennes des modules de Young (E) et des coefficients de Poisson (ν) sont d'environ 30 289 Mpa , 0.25 pour 1995 et 27307 Mpa , 0.21 pour 1995.

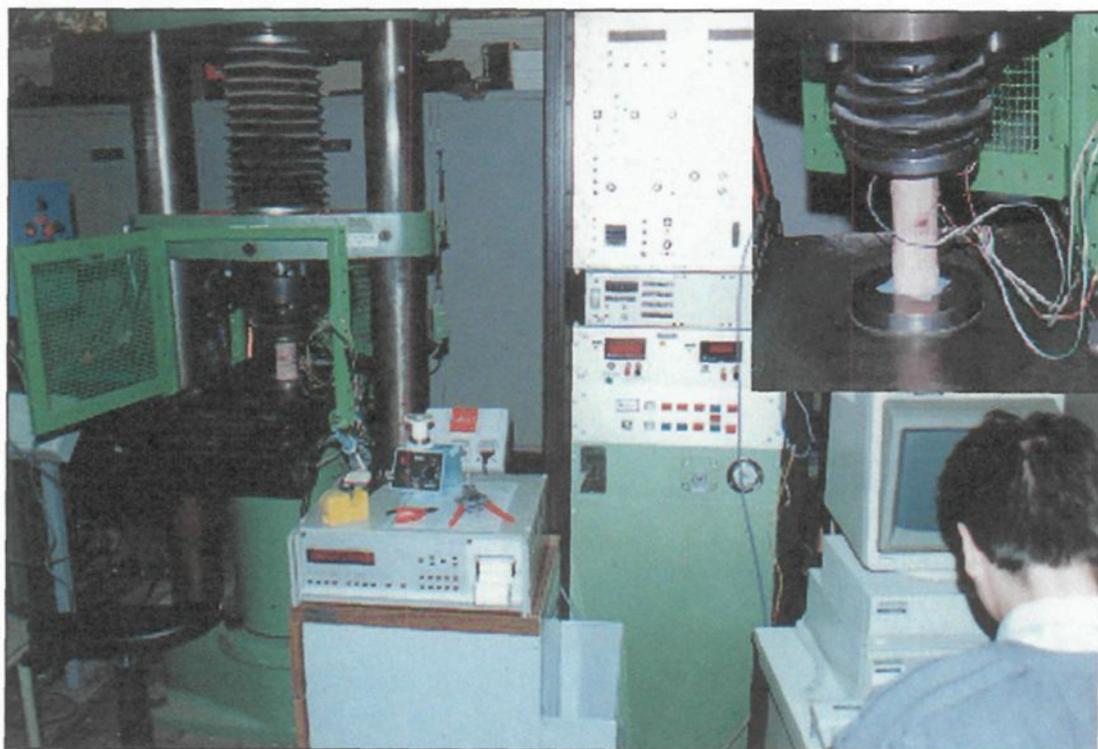


Photo A1.3 : Test de déformabilité

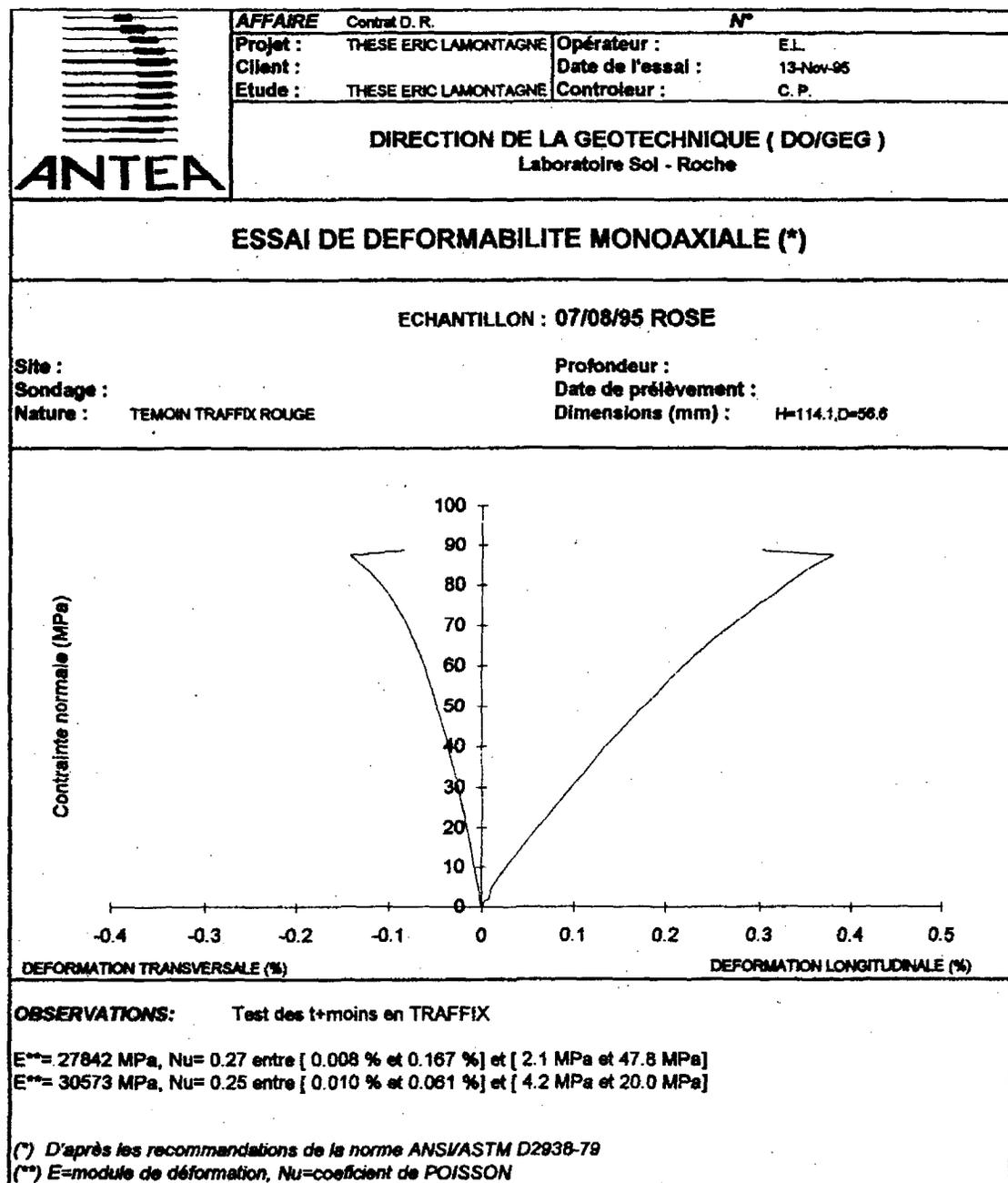


Figure A1.2: Exemple de courbe d'essai de déformabilité

Caractérisation hydraulique

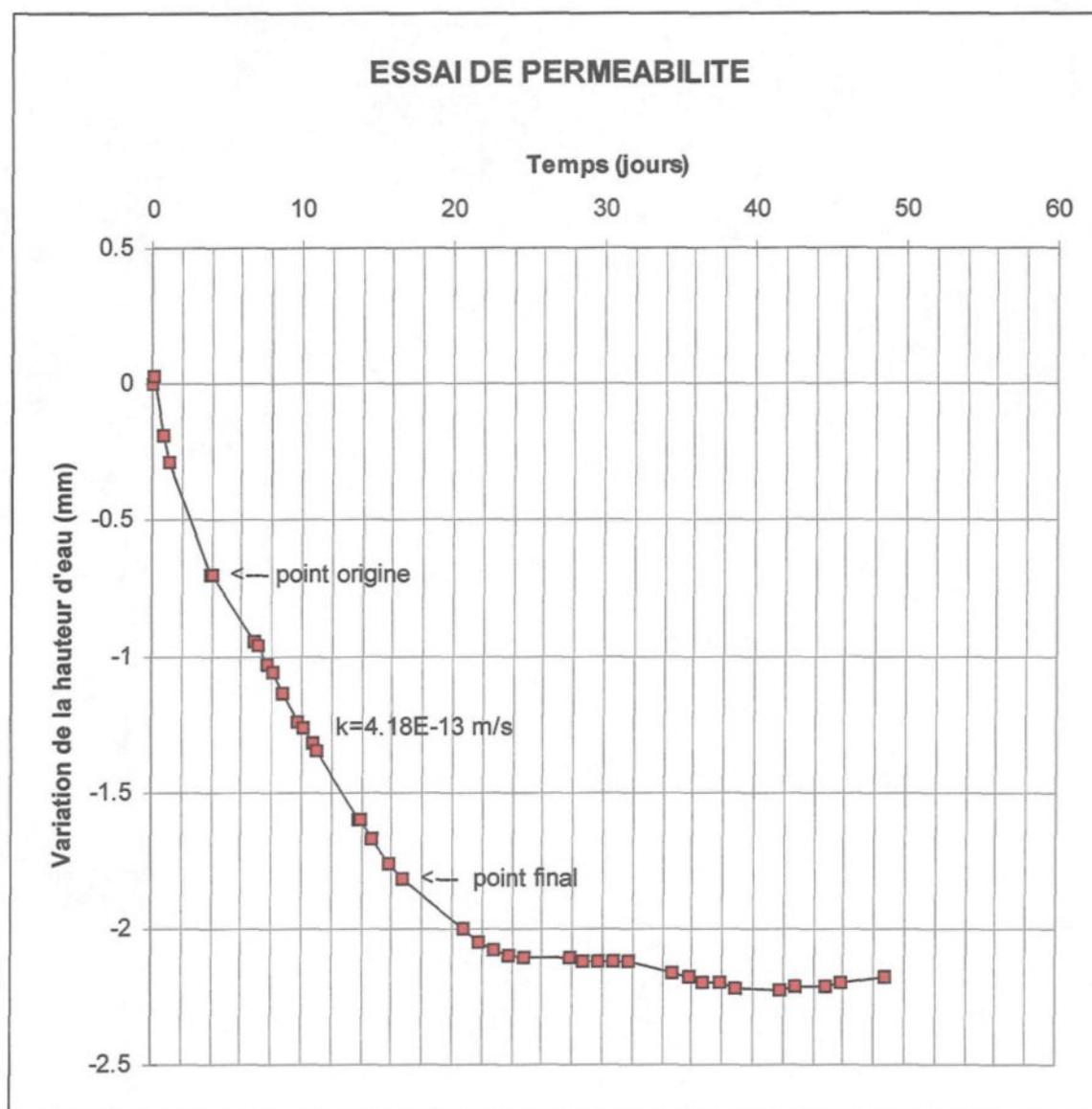
A1.3.4 Perméabilité

Des essais de perméabilité en cellule triaxiale ont été faits pendant l'automne 1995 et 1996. Ces essais avaient pour but de donner une idée de la perméabilité de la matrice du mortier traffix et de vérifier si des mesures pour l'imperméabiliser seront nécessaires afin qu'il se comporte le plus possible comme la matrice d'un granite.

Le diamètre des l'échantillons de mortier font 69,6 mm et sont d'une hauteur de 46,9 mm. Nous avons appliqué une pression de confinement de 6 bars, une pression d'injection de 4 bars et une contre pression de 1 bar. Les perméabilités mesurées sont de : 2.26×10^{-13} , 4.18×10^{-13} et 8.71×10^{-13} (Tableau A1.8). Étant donné que nous avons utilisé la même procédure expérimentale, la valeur moyenne obtenue de $5,05 \times 10^{-13}$ semble fiable et pourra être utilisée pour caractériser le mortier. Ces valeurs obtenues de la matrice du mortier étant proches de celle de la matrice d'un granite fait en sorte que nous n'avons pas à essayer de diminuer la perméabilité de celle-ci à l'aide d'adjuvants. De plus, afin de garder les caractéristiques du mortier, l'emploi d'adjuvants est formellement déconseillé par le fabricant.

Tableau A1.8: Essais de perméabilité à charge constante

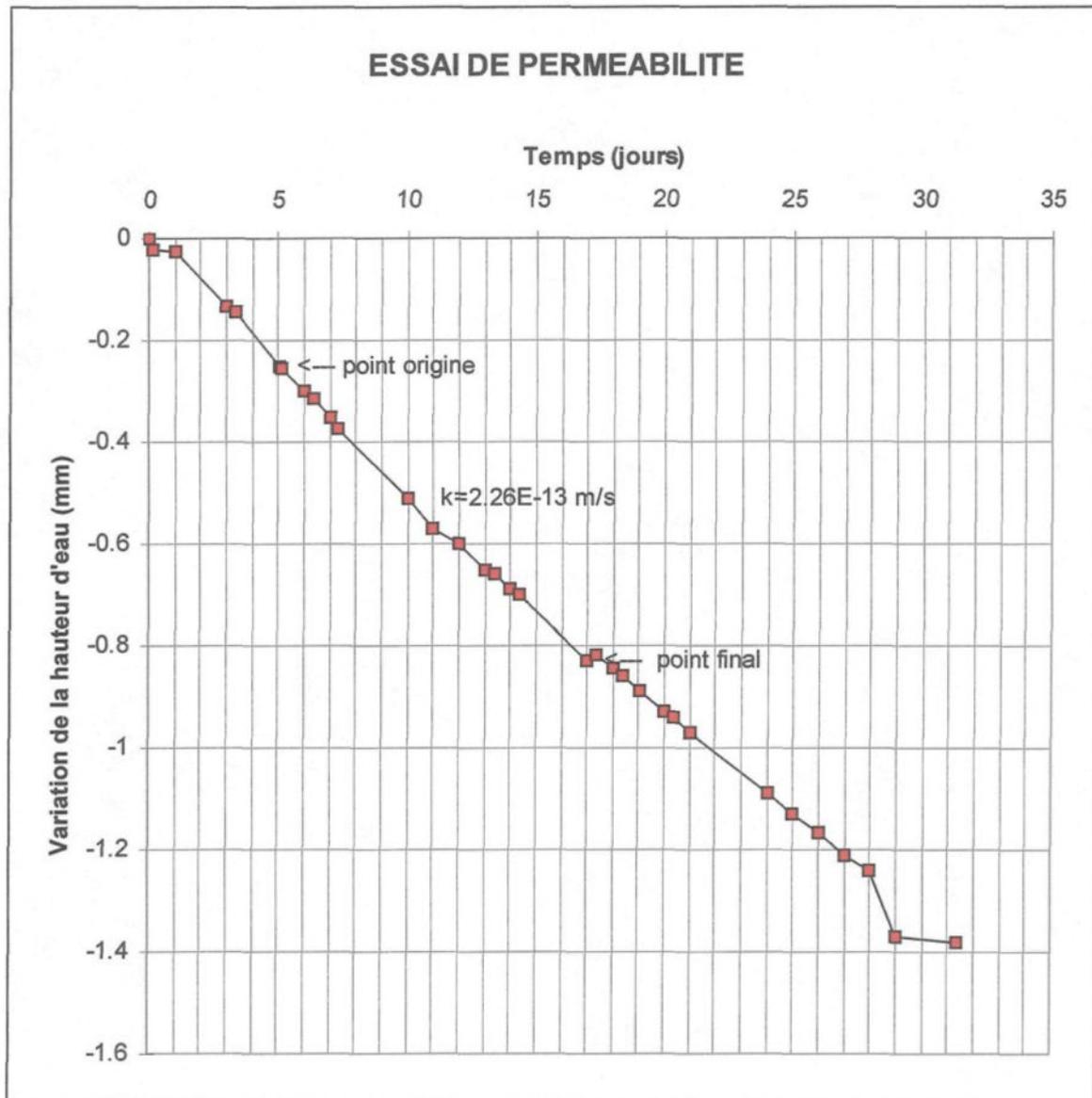
ANTEA		ESSAI DE PERMEABILITE A CHARGE CONSTANTE	
Echantillon : Mortier TRAFFIX thèse Eric LAMONTAGNE	N° Projet :	Date : 18-sept-96	
Site : Labo		Contrainte effective : 0.00 MPa verticale	
Profondeur :		Perméabilité (m/s) : 4,18E-13	
Nature : Traffix			





ESSAI DE PERMEABILITE A CHARGE CONSTANTE

Echantillon : Mortier TRAFFIX thèse Eric LAMONTAGNE	N° Projet :
Site : Labo	Date : 21-juin-96
Profondeur :	Contrainte effective : 0.00 MPa verticale
Nature : Traffix	Perméabilité (m/s) : 2,26E-13

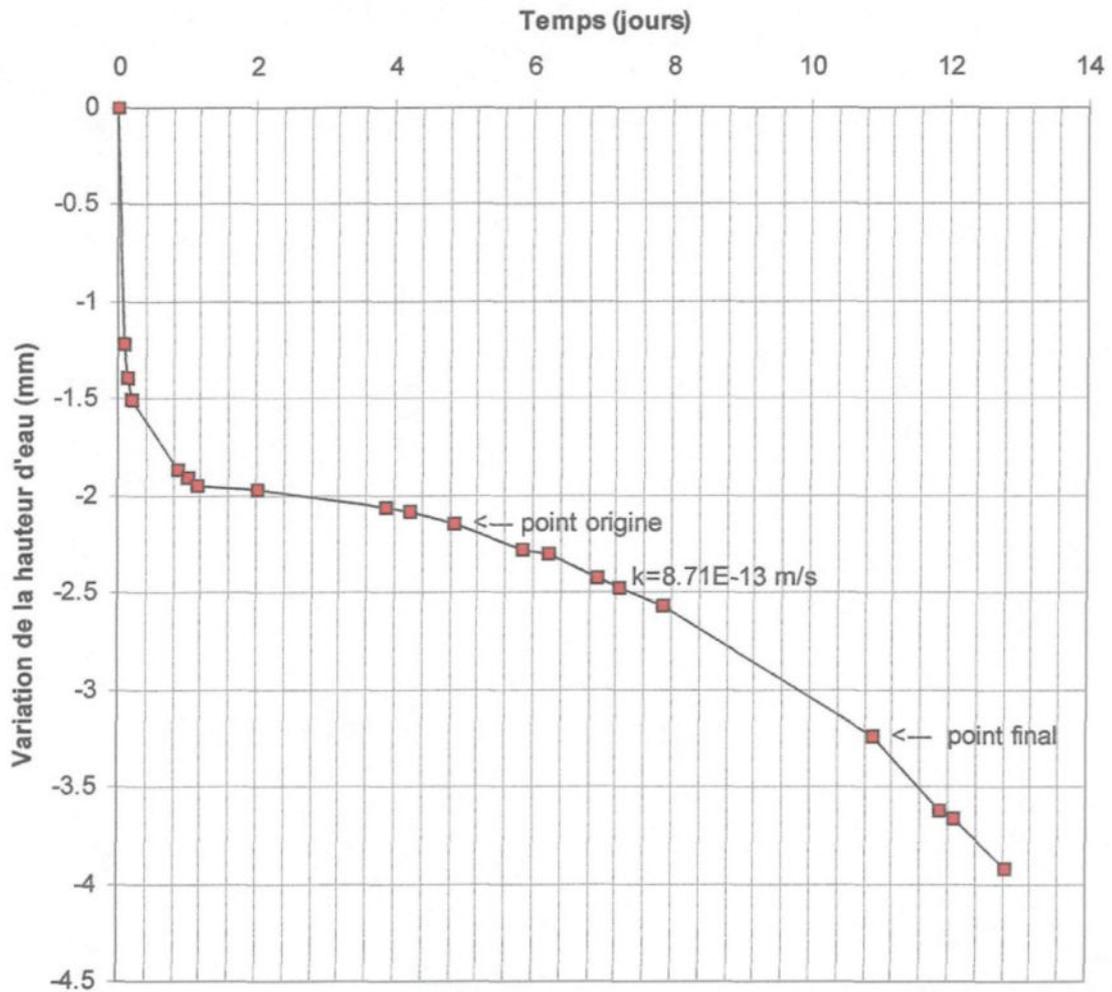




ESSAI DE PERMEABILITE A CHARGE CONSTANTE

	N° Projet :
Echantillon : Carotte de mortier thèse Eric LAMONTAGNE	Date : 01-août-96
Site : Laboratoire	Contrainte effective : verticale
Profondeur :	Perméabilité (m/s) : 8,71E-13
Nature : Traffic rouge du 18/06/96	

ESSAI DE PERMEABILITE



ANNEXE 2
FABRICATION DES RÉPLIQUES

ANNEXE 2

FABRICATION DES RÉPLIQUES

Date 1995	Temp.	Quantité ciment	Quantité d'eau	Quantité colorant blanc	Quantité colorant rouge	Nb moules (ancien)	Nb moules (nouveau)	Formes (litre + litres)	Démoulage (ok ou non)	Commentaires
-31- Jui.	28	20kg	3.6 L	60g	60g	2 paires	2 paires	3 tubes	ok	Les deux paires faites avec les nouveaux moules sont à surfaces planes.
-1- Aug.	28	11 kg	1.98 L	66g	66g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien non nouveau	Erreur: Deux fois plus de colorant de chaque couleur. Eclatement de morceaux de répliques au démoulage. Ces éclatements se retrouvent dans les parties basses du porte négatif. Conseil: la prochaine fois, démolir dans l'axe. Le mortier a adhéré sur le support vertical. Conseil: Mettre un tape à l'interface.
-2- Aug.	27	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien non nouveau	Eclatement de morceaux de répliques au démoulage. Ces éclatements se retrouvent dans les parties basses du porte négatif. Le démoulage a été fait dans l'axe à l'aide du tour (A6).
-3- Aug.	27	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien non nouveau	Durcissement au réfrigérateur à 4°C. Réutilisation des tubes du 1 Août 1995. On a réussi à décoller le mortier des tubes en le carottant, puis en le chauffant à 250°C. Un tube présente maintenant un léger défaut. Au démoulage, on remarque un retrait de quelques mm. du mortier et une faible adhérence avec le tube. Eclatement de morceaux de répliques au démoulage. Apparition de tâches d'où on ne peut dire la provenance.
-7- Aug.	23	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien ok nouveau	Durcissement au réfrigérateur à 4°C et 12°C. Application d'une cire démoulante. Réutilisation des tubes.

Tableau A2.1: Réalisations des répliques de 1995 (suite ...)

Date 1995	Temp.	Quantité ciment	Quantité d'eau	Quantité colorant blanc	Quantité colorant rouge	Nb moules (ancien)	Nb moules (nouveau)	Formes (litre + litres)	Démoulage (ok ou non)	Commentaires
-8- Aug.	21	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien ok nouveau	Durcissement au réfrigérateur entre 15 et 17°C. Réutilisation des tubes. Application d'une cire démoulante.
-10- Aug.	23	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien ok nouveau	Fabrication d'un nouveau négatif en silicone. Arrêt du collage du pourtour de l'empreinte de silicone aux parois du porte négatif. Durcissement au réfrigérateur entre 15 et 17°C. Application d'une cire démoulante. Présence de trois tâches inexplicables au pourtour de la réplique grise. Pour la réplique rouge, le tube s'est décollé quelques peu lors du démoulage.
-21- Aug.	29	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien non nouveau	Application d'une cire démoulante. Durcissement à l'humidité. Problème: Tubes trop courts, infiltration de béton entre le tube et le support, les trous ne se superposent plus. Eclatement de morceaux de répliques au démoulage. Nous avons gardé ces répliques, car les tubes sont défectueux.
-22- Aug.	27	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien ok nouveau	Durcissement au réfrigérateur entre 15 et 17°C. Application d'une cire démoulante. Présence de tâches inexplicables au pourtour.
-23- Aug.	29	11 kg	1.98 L	33g	33g	1 paire	1 paire	3 tubes	ok ancien ok nouveau	Durcissement au réfrigérateur entre 15 et 17°C. Application d'une cire démoulante. Présence de tâches inexplicables au pourtour.

Remarque: - La colonne commentaire s'applique exclusivement au nouveau dispositif.

-L'ancien dispositif (tube en "PVC" avec parois intérieur en silicone) présente un taux de réussite de 100 avec prise en chambre humide.

Tableau A2.1: Réalisations des répliques de 1996 (suite ...)

Date 1996	Temp. Prégn.	Quantité ciment	Quantité d'eau	Quant. colorant		Nb. moules	Tessons Nat. rose + Blanc	Démoulage (ok ou non)	Nombre de Négatif	Nombre de Échantillon
				Rose	Blanc					
-02-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-3-	-12-
-03-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-3-	-13-
-04-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-3-	-14-
-08-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-3-	-15-
-09-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-4-	-6-
-10-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-4-	-7-
-11-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-4-	-8-
-15-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-4-	-9-
-16-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-5-	-10-
-17-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-5-	-16-

Tableau I: Réalisations des répliques de 1996 (suite ...)

Date 1996	Temp. Prégn.	Quantité ciment	Quantité d'eau	Quant. colorant		Nb. moules	Tessons Nat. rose + Blanc	Démoulage (ok ou non)	Nombre de Négatif	Nombre de Échantillon
				Rose	Blanc					
-18-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-5-	-17-
-22-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-6-	-18-
-23-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-6-	-19-
-24-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-6-	-20-

Tableau A2.1: Réalisations des répliques de 1996 (suite ...)

Date 1996	Temp. Priso.	Quantité ciment	Quantité d'eau	Quant. colorant		Nb. moules	Témoins Nat. + trace + Blanc	Démoulage (ok ou non)	Numero du Négatif	Numero de l'échantillon
				Rose	Blanc					
-18-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-5-	-17-
-22-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-6-	-18-
-23-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-6-	-19-
-24-Jul.	15	10 kg	1.8L	30g	30g	1 paire	3 tubes	oui	-6-	-20-

A2.1 Réalisation des répliques en 1995, pièces nécessaires au dispositif

Porte négatif

Le porte négatif est réalisé en acier inoxydable pour éliminer les problèmes d'interaction avec l'eau du mortier (oxydation). La forme et les dimensions, à l'exception de la saillie, seront exactement les mêmes que celles utilisées antérieurement par R. Flamand (2000) (figure A2.1, photo A2.1). La partie en saillie est ramenée, pour maintenir une garde minimale de 2 mm, à une hauteur constante de 5 mm.

Frette ou tube

Le tube est réalisé en acier dur. Les avantages sont; le prix, l'usinage, le module identique aux croissants de la machine de cisaillement.

L'épaisseur du tube est la même que celle de la saillie du porte négatif, soit 2 mm. Cette épaisseur donne au tube, un diamètre intérieur de 120 mm et un diamètre extérieur de 124 mm. Les tubes ont une hauteur constante de $(155 - (10+2+2))/2 = 70.5$ mm (figure A2.2).

155 mm: 150 mm = hauteur totale de la boîte de cisaillement.

4 mm = hauteur laissée pour sortir les tuyaux du dispositif hydraulique
entre les deux demi-boîtes

1 mm = hauteur laissée pour araser par la suite

10 mm: Écart entre le point le plus haut et le point le plus bas de la fracture.

2 mm: Espace laissé de chaque côté de la fracture pour le collage du dispositif
hydraulique.



Photo A2.1 : Porte négatif



Photo A2.2 : Supports

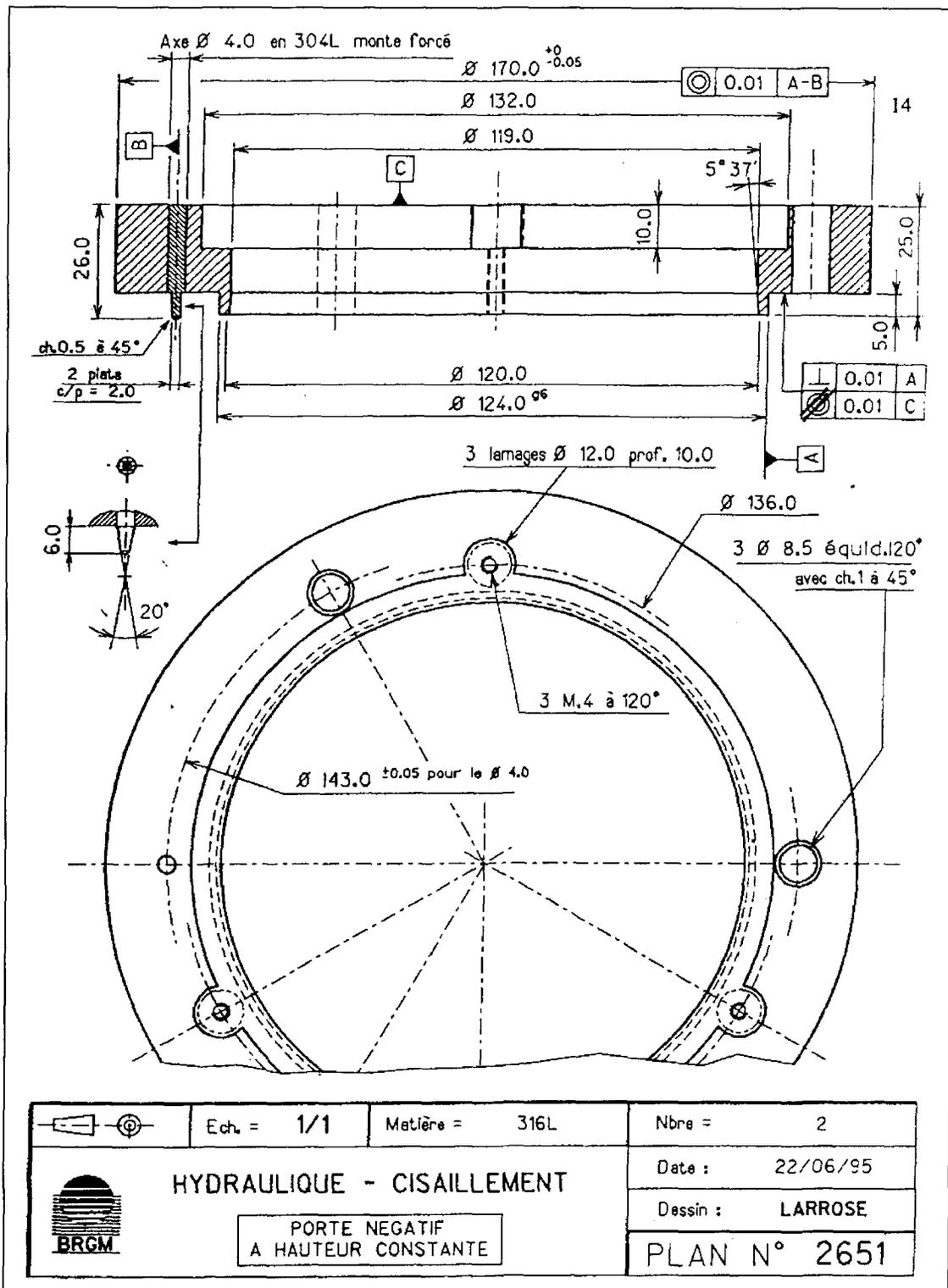


Figure A2.1 : Plan du porte négatif

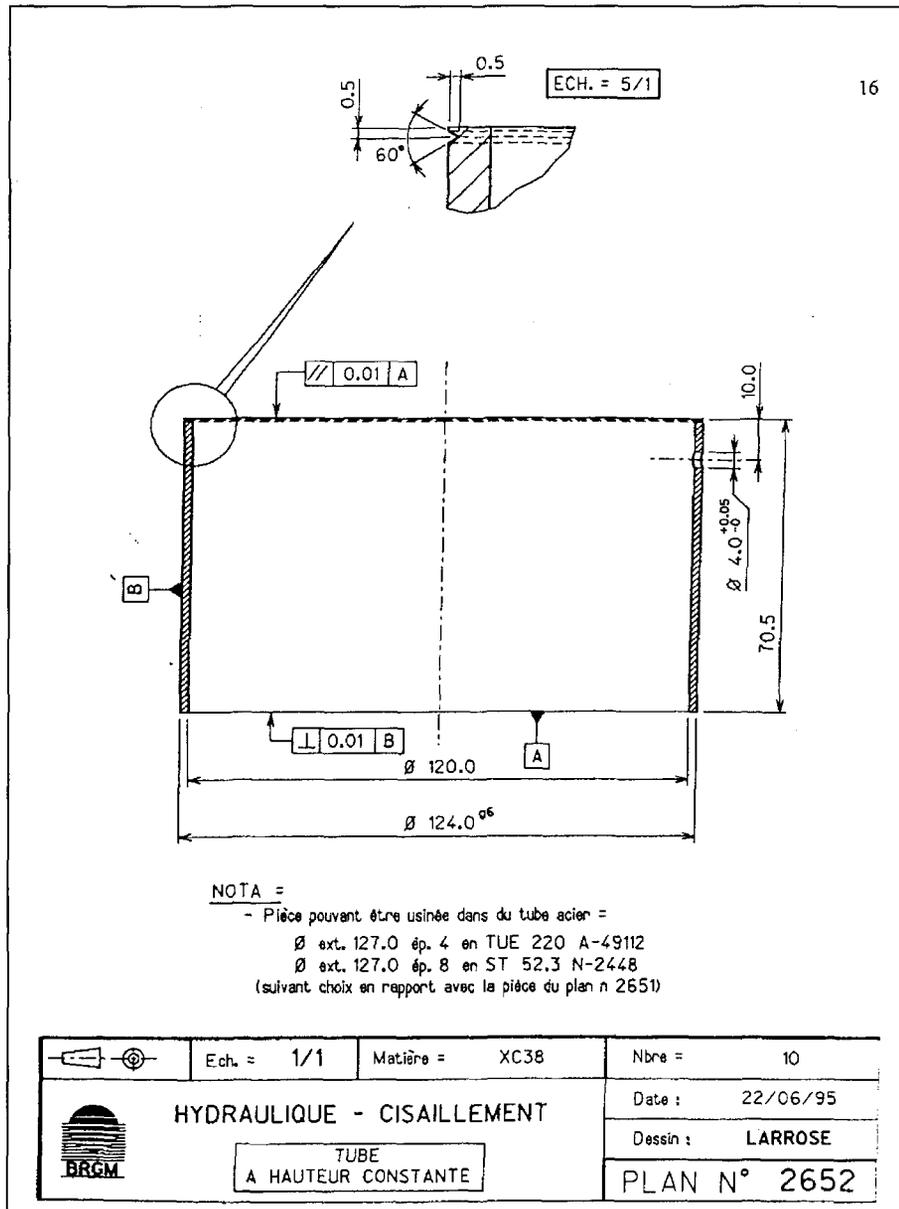


Figure A2.2: Plan du tube

Support

Le support est réalisé en acier inoxydable. Il garanti que l'éponte sera cylindrique. Il doit permettre de supporter les parois du tube (support latéral) et de l'empêcher de se soulever (support vertical) (Figure A2.3, photo A2.2). Il est à remarquer que le tube et le support sont percés en un endroit dans l'axe du pion. Ce trou sert au repérage de l'échantillon dans la machine de cisaillement.

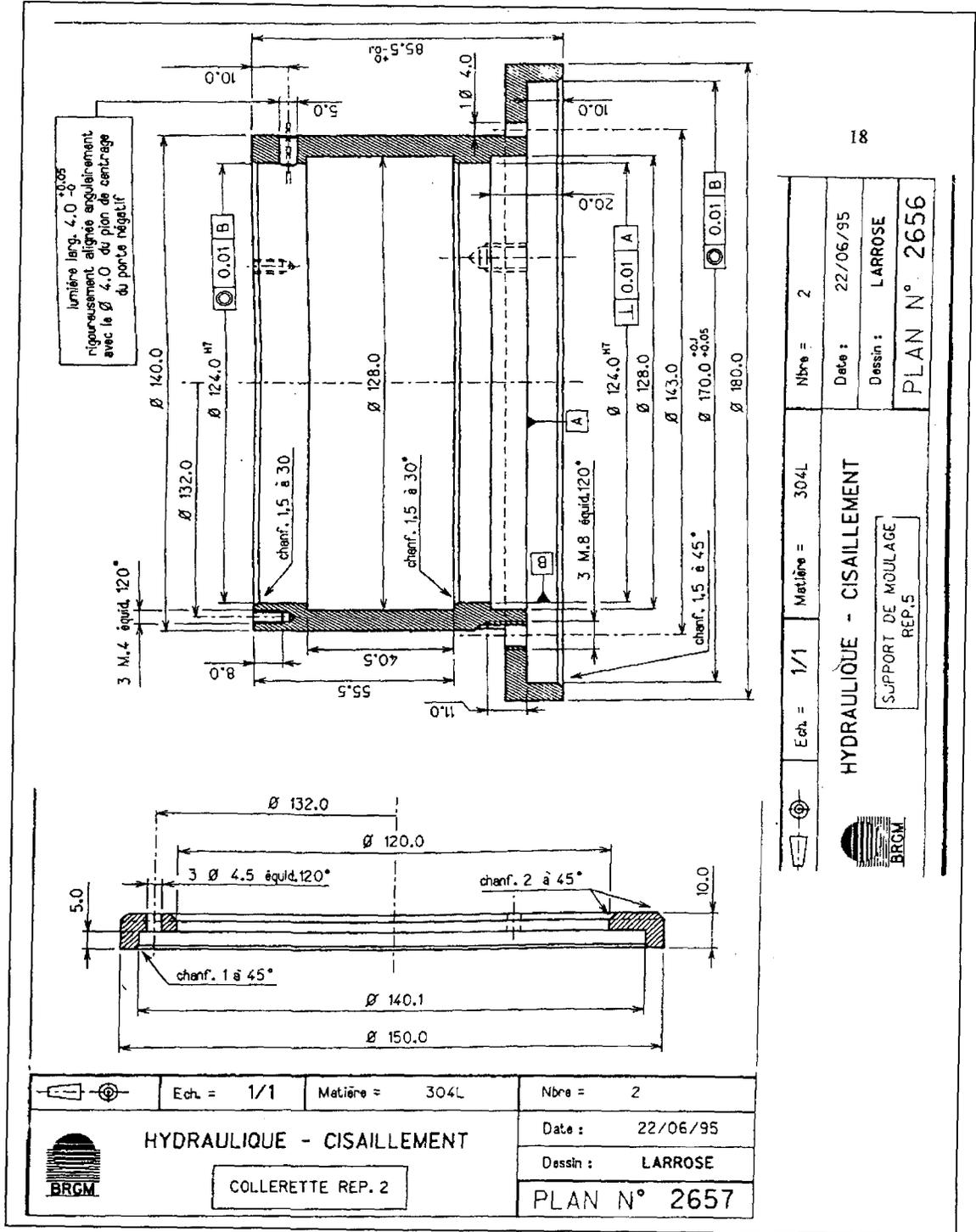


Figure A2.3 : Plan des supports

A2.2 Moulage en silicone de la fracture à l'aide des portes négatifs

Fabrication du silicone

Le silicone est composé d'une partie blanche (RTV 1556 A PA + 10% 1556BR) et d'une partie rose (RTV 1556 B). Pour la fabrication, il faut mélanger dans un rapport de 10 pour 1 le blanc avec le rose. Une fois qu'on a pesé les proportions adéquates (exemple: 500 g de blanc avec 50 g de rose pour le moulage de deux portes négatifs) et qu'on a bien mélangé les deux composantes, il faut enlever les bulles d'air à l'aide d'une cloche à vide.

Coulage du silicone dans le porte négatif

Le coulage du silicone dans le porte négatif se fait en cinq étapes. La première, consiste à vaporiser un fixatif sur la fracture originale afin d'empêcher les paillettes de minéraux de se coller au silicone. La deuxième étape consiste à fixer le porte négatif sur le boîtier de la fracture originale par l'intermédiaire de trois écrous (photo A2.3). La troisième étape consiste à remplir le porte négatif de silicone jusqu'à la hauteur où celui-ci s'agrandit (à angle droit). A cette hauteur, on procède (quatrièmement) à l'installation d'une grille en acier (photo A2.4) pour rendre l'ensemble plus rigide. Cinquièmement, on remplit complètement de silicone le porte négatif jusqu'à la surface.

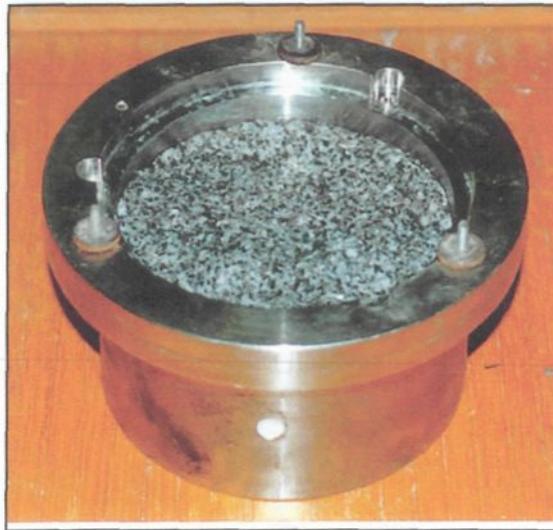


Photo A2.3 : Fracture originale



Photo A2.4 : Coulage du silicone

Démoulage

Il faut laisser durcir de 3 à 5 heures (température de la pièce) le silicone avant le démoulage. Pour démouler, il suffit de dévisser les écrous qui retiennent ensemble le boîtier de la fracture originale et le porte négatif. Une fois les deux pièces séparées l'une de l'autre, il faut tailler la saillie restante au pourtour du porte négatif (photo A2.5).

Cette saillie, non désirable, a été engendrée par le surcarottage de l'échantillon originale afin de permettre l'emboîtement du porte négatif.



Photo A2.5 : Porte négatif au démoulage

A2.3 Préparation du porte négatif avec empreinte de la fracture en silicone

Deux préparations différentes ont été effectuées sur la surface de l'empreinte de la fracture en silicone et des parois du porte négatif. La première préparation consistait à coller le silicone aux parois du porte négatif afin d'éviter l'infiltration du béton. De plus, nous avons vaporisé du téflon sur les parois du porte négatif pour faciliter le démoulage. Au cours de la fabrication des répliques, étant donné que le collage lâchait, nous étions obligées de recoller le silicone. Les épaisseurs de colle ont eu l'effet non souhaitable de laisser infiltrer du béton en refermant la fracture vers le centre. Le téflon appliqué aux parois du porte négatif, n'arrêtait pas la fracturation en bordure lors du démoulage.

La deuxième préparation du porte négatif consista à appliquer uniformément à l'aide d'un pinceau de précision, une cire démoulante (solution de cire dans du perchloréthylène) sur la surface de silicone et au pourtour des parois du porte négatif.

A2.4 Assemblage du dispositif

La démarche à suivre pour l'assemblage du dispositif est la suivante: il faut 1) assembler le porte négatif (A ou B) et le support latéral correspondant (identifier à l'emplacement du pion) par l'intermédiaire de 3 écrous; 2) faire glisser le tube bien nettoyé à l'acétone dans le support latéral (il est important que ce tube soit bien nettoyé pour permettre au béton d'adhérer aux parois du tube); 3) fixer le tube dans l'axe du pion à l'aide des trous du support et du tube et 4) fixer le support vertical sur le support latéral par l'intermédiaire de trois écrous. Il est à noter qu'on a introduit un collant à la base du support vertical pour faciliter le démoulage en empêchant le béton de se fixer. Normalement, si le montage est bien effectué et que les pièces ont les dimensions exactes, le serrage du support vertical sur le support latéral coïncera le tube dans l'axe du pion (photo A2.6). Finalement, il est important de boucher le trou intérieur du tube à l'aide d'un papier gommant pour éviter les infiltrations du mortier.

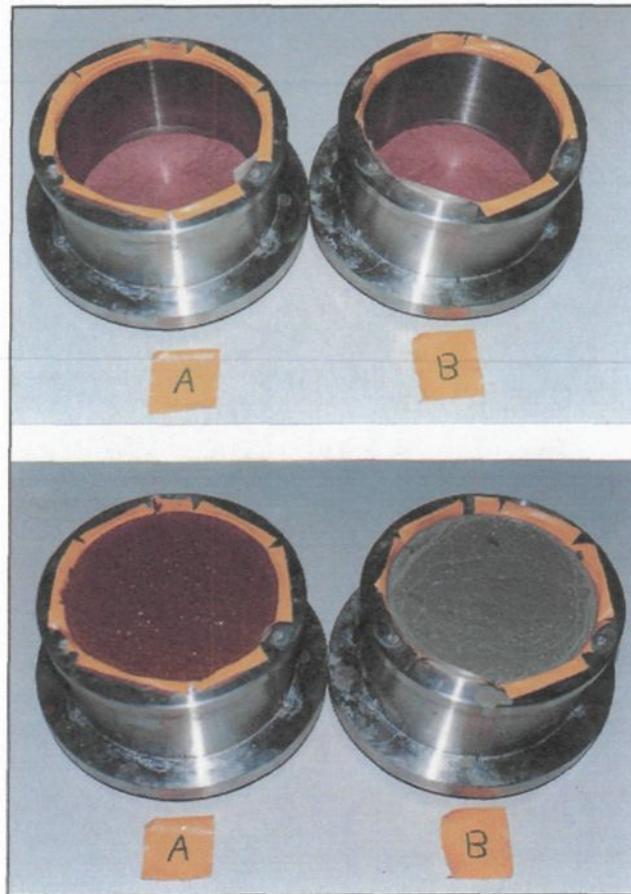


Photo A2.6 : Assemblage du dispositif

A2.5 Préparation du mortier

Mortier

Le mortier utilisé pour la réalisation de ces répliques est le traffix (Lanko 711). Ce mortier se vend en sac de 25 kg. et donne 13.5 litres de mortier en place. On prépare ce mortier en ajoutant 4.5 litres d'eau de gâchage par sac de 25 kg. Il est à remarquer que l'ajout d'adjuvant est fortement déconseillé dans ce mortier. De plus, il faut faire attention de ne pas suivre la préparation trompeuse qui apparaît sur les sacs de ciment.

Colorants

Dans la préparation de mortier (divisé en deux sceaux), nous ajoutons des colorants (rose et gris) afin de mieux distinguer les zones endommagées lors des essais de cisaillement. Le colorant rose correspond à l'éponte A alors que le gris correspond à l'éponte B. Pour avoir approximativement la même teinte que les épontes de R. Flamand de 1994, nous avons établi qu'il fallait 6 g. de colorant par kg. de mortier.

Mélange et coulage

Une fois que nous avons bien pesé et mesuré les quantités nécessaires de mortier, eau de gâchage et colorant, nous pouvons débiter la fabrication des répliques en mortier. Il faut: 1) mélanger dans un seau le mortier et l'eau de gâchage; 2) remplir un échantillon témoin de ce mortier naturel et le vibrer; 3) diviser de façon égale le mortier dans deux sceaux; 4) ajouter les colorants et bien mélanger; 5) remplir des échantillons témoins de ces mortiers colorés et les vibrer; 6) préparer une solution d'eau avec un peu de savon; 7) appliquer à l'aide d'un pinceau cette eau savonneuse sur le négatif de la fracture en silicone; 8) prendre un peu de mortier et l'étendre à l'aide d'un autre pinceau sur le négatif de la fracture en silicone savonneuse; 9) remplir le moule complètement de mortier; 10) vibrer le moule 30 secondes pour faire remonter les bulles en surface; 11) recommencer les étapes 7 à 10 pour les autres moules.

Démoulage

Il faut laisser durcir de 15 à 20 heures le mortier avant de le démouler. Habituellement, ce durcissement se fait à l'armoire humide (25 à 30°C et 100%

d'humidité) comme cela a été le cas pour les répliques fabriquées avec les anciens moules. Le taux de réussite pour ces anciens moules de "PVC" en silicone à l'intérieur est de 100 %. Mais avec notre nouveau dispositif de fabrication des répliques, le durcissement se faisait trop rapidement en chambre humide (taux de réussite: 0%). Nous avons pensé ralentir ce durcissement en plaçant les répliques au réfrigérateur (4°C). Le ralentissement fût trop accéléré (taux de réussite: 0%). Nous avons modifié le réfrigérateur à l'aide d'un thermostat pour obtenir une température qui se situe entre 15 et 20°C et nous avons changé en même temps notre préparation du porte négatif, passant du téflon vers une cire démoulante. Le taux de réussite a été de 100%. Étant donné que nous avons fait deux modifications en même temps et que le résultat fût positif, nous ne pouvions savoir laquelle était la bonne. Nous avons essayé les deux changements séparément, c'est-à-dire un durcissement au réfrigérateur avec la première méthode de préparation du porte négatif (téflon aux parois) et un durcissement à la chambre humide avec l'application de la cire démoulante. Le résultat fût le même, soit négatif (0% de réussite). Donc, c'est la combinaison des deux (cire démoulante et durcissement au réfrigérateur à 15°C) qui a permis d'obtenir des répliques de bonnes qualités.

Vieillessement des répliques

Le vieillissement minimum des répliques est de 30 jours pour qu'elles atteignent les exigences mécaniques. Ce vieillissement a débuté les trois premiers jours à l'armoire humide pour ensuite être remises à la température ambiante.

A2.6 Taches

Des taches apparaissent quelquefois, lors du démoulage, à la surface des répliques (photo A2.7) ainsi que sur l'empreinte en silicone de la fracture. Ces taches avaient aussi été remarquées antérieurement par R. Flamand (2000). Ces taches peuvent peut être s'expliquer par un grain de colorant mal mélangé et ou par le savon utilisé pour éviter les bulles et/ ou par une réaction avec les agents démoulant (téflon, cire démoulante).



Photo A2.7 : Taches sur les répliques

A2.7 Fabrication des répliques de 1996 et modifications apportées

Quelques modifications ont été apportées en 1996 dans la fabrication des répliques afin d'optimiser les résultats obtenus.

- Traçage d'une ligne verticale sur les tubes d'acier perpendiculairement au trou de repérage. Cette ligne permettra un positionnement optimum dans la machine de cisaillement.
- Une collerette intérieure de 5 mm par 5 mm a été rectifiée sur les croissants inférieurs et supérieurs afin de faciliter le collage du dispositif de récupération.
- La quantité de mortier-eau-colorant a été la même que celle utilisée en 1995, mais on remarque visuellement lors du mélange que le mortier obtenu est beaucoup plus fluide que celui de 1995.
- A la rectification nous avons toujours utilisé un même jeu de cales avec une réplique inférieure identique afin de rectifier la réplique supérieure toujours selon la même cote.
- Nous avons remarqué un décentrage du trou d'injection lors du surcarottage de 10 mm de diamètre. Ce décentrage s'explique par la baisse du plateau le long d'une vis décentré. Cette manipulation est nécessaire étant donné que le foret de 10 mm est plus long que celui de 6 mm.
- Nous avons utilisé un nouveau dispositif pour le démoulage des échantillons. Lors de la première phase nous utilisons un tour pour démouler les échantillons. Nous démoulions dans l'axe horizontal. Ce procédé amenait l'échantillon à se briser aux pourtours par son propre poids lorsque qu'il se libérait de son adhérence avec le porte négatif. Nous avons donc conçu un

procédé pour le démoulage dans l'axe vertical (photo A2.8). Ce procédé permet de séparer doucement le porte négatif de l'échantillon selon l'axe vertical.

- Avant le collage du système de récupération, nous refermons les espaces entre la frette d'acier et l'échantillon en tirant un joint de colle. Cette étape permettra d'éviter pendant les essais d'injection les fuites d'eau entre la frette d'acier et la réplique.



Photo A2.8 : Démoulage des répliques

ANNEXE 3
MONTAGE DU SYSTÈME DE CAPTAGE

ANNEXE 3

MONTAGE DU SYSTÈME DE CAPTAGE

Préparation des répliques pour les essais hydromécaniques en cisaillement

(Première phase, 1995)

A3.1. Nettoyage et protection des tubes à l'oxydation

Les tubes d'acier formant les supports extérieurs des répliques furent oxydés lors du séchage du mortier à la chambre humide. Afin d'enlever cette oxydation et de prévenir une éventuelle oxydation, nous avons traité les tubes à l'acide.

A3.2. Surfaçage des répliques

Afin d'obtenir des répliques parfaitement parallèles, ainsi qu'à une hauteur adéquate, il faut raboter les répliques à l'aide d'une surfaceuse (photo A3.1).

Le trait que nous avons fait usiner dans les tubes à 0.5 mm de hauteur nous a permis de raboter les répliques aux dimensions souhaitées.

A3.3. Forage d'un puits d'injection

Le forage d'un puits d'injection doit être fait au centre de la réplique inférieure (rose) afin de pouvoir faire des injections radiales lors des essais hydromécaniques en cisaillement. Ce forage est centré à l'aide d'un guide (photo A3.2) et fait 6 mm de diamètre. Par la suite, un surcarottage de 10 mm de diamètre et de quelques millimètres de profondeur est fait à la surface de la fracture (photo A3.3).



Photo A3.1: Rectification des répliques



Photo A3.2: Forage d'un puits d'injection centré de 6 mm de diamètre



Photo A3.3: Surcarrotage de 10 mm de diamètre

A3.4. Collage dans le puits d'un tube d'injection

Un tube d'injection de 100 mm de longueur, en acier inoxydable, est collé dans le puits d'injection. Ce tube monte jusqu'au surcarrotage du côté de la fracture et dépasse, de l'autre côté, d'environ 25 mm (photo A3.4). Un joint de colle dans la collerette du surcarrotage permet l'étanchéité entre le tube et le puits d'injection. La colle utilisée pour le collage du tube d'injection et de la collerette est de l'araldite (deux composantes: résine et durcisseur).

A3.5. Préparation de la surface de mortier non recouverte

Il est difficile de faire tenir par collage le dispositif hydraulique de récepteurs en latex sur la surface de mortier non recouverte d'acier. En effet, les fines particules à la surface du mortier ainsi que la porosité de ce dernier rendent le collage du dispositif hydraulique de récepteurs en latex sur le mortier inefficace.

Pour pallier à ce problème, nous avons dans un premier temps gratté la surface du mortier à l'aide d'un papier de verre afin d'enlever les fines particules de surface. Dans un deuxième temps, nous avons appliqué de la colle araldite sur cette surface afin de coller le dispositif hydraulique en latex sur une colle (colle sur colle) et non sur le mortier poreux (photo A3.5).

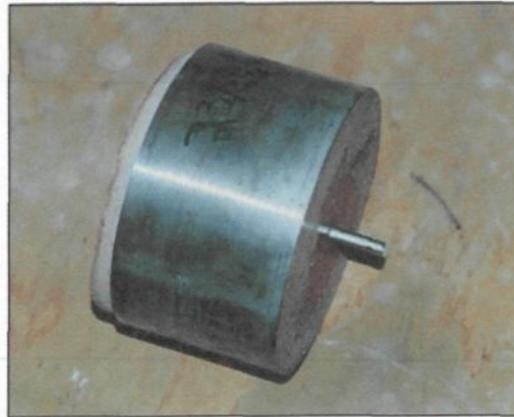


Photo A3.4: Collage d'un tube d'injection



Photo A3.5: Préparation de la surface en mortier

A3.6 Nettoyage des répliques à l'acétone

Avant de coller le dispositif de récepteurs ou de récupération sur les répliques, il faut bien nettoyer la périphérie des épontes ainsi que celles des tubes à l'acétone. La colle utilisée pour le collage du dispositif de récupération est inefficace en présence de saleté ou de graisse. Par le fait même, il est fortement recommandé de faire le collage de ce dispositif avec des gants.

A3.7. Collage du dispositif hydraulique

Le dispositif hydraulique de récepteurs permet de récupérer l'eau injectée au centre de la fracture dans huit secteurs disposés au pourtour de la fracture (photo A3.6). La mise en place (collage) de ce dispositif se fait en 3 étapes: a) collage de la bande inférieure composé de huit fenêtres; b) collage de la bande supérieure qui recouvre les fenêtres; c) collage des tuyaux de récupération.



Photo A3.6: Dispositif de captage du fluide

a) Bande inférieure

La bande inférieure est fabriquée dans une membrane en latex qui fait 1 mm d'épaisseur. Cette bande d'une largeur de 24 mm et d'une longueur identique au périmètre de la fracture est percée de huit fenêtres qui suivent le profil de la fracture (photo A3.7). Ces fenêtres ovales font 8 mm et 35 mm de petit et grand diamètre. La largeur de cette bande est limitée par l'espace qui reste lorsque la réplique est entourée des croissants supérieurs et inférieurs. Le collage de cette bande sur la réplique se fait à l'aide d'un ensemble de Loctite Polyoléfine. Cet ensemble est composé d'un primaire d'accrochage Loctite 770 et d'un adhésif instantané Loctite 406. Une précaution importante est à prendre lors du collage des espaces entre les fenêtres. Étant donné que

cette colle mouille très bien, il faut faire attention à la quantité qu'on applique car on risque une propagation dans la fracture.

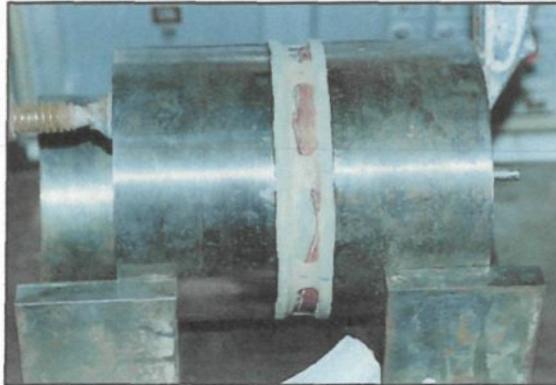


Photo A3.7: Bande inférieure du système de récupération

b) Bande supérieure

La bande supérieure est fabriquée dans une membrane en latex de 0.5 mm d'épaisseur. Cette bande, qui fait la même largeur et la même hauteur que celle inférieure, est percée de 8 trous de 3 mm de diamètre. Ces trous sont centrés au milieu des fenêtres de la bande inférieure (photo A3.8). Cette bande est collée avec le même ensemble de Loctite Polyoléfine.

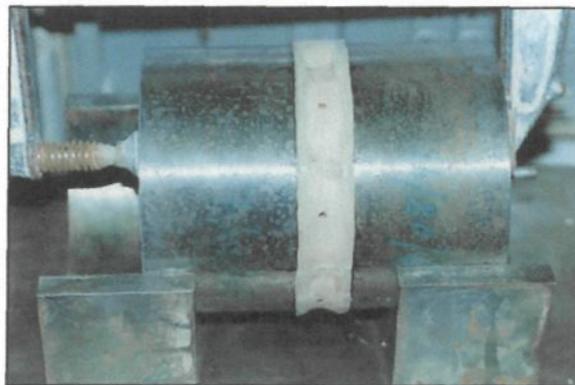


Photo A3.8: Bande supérieure du système de récupération

c) Tuyaux de récupération

Les tuyaux de récupération en Rilsan font 4 mm de diamètre extérieur, 2.7 mm de diamètre intérieur et 60 cm de longueur. Ils servent à acheminer le fluide recueilli dans les secteurs vers les bacs de récupération. Une collerette de 2 mm est faite à une extrémité à l'aide de moules (photo A3.9). Ces collerettes, qui facilitent l'assemblage avec les bandes en latex, sont introduites (par les trous de diamètres 3 mm) et collées sous la bande supérieure (photo A3.10). Pour étancher le pourtour des tuyaux, une rondelle est collée à l'extérieure de la bande supérieure.



Photo A3.9: Fabrication des collerettes des tuyaux de récupération

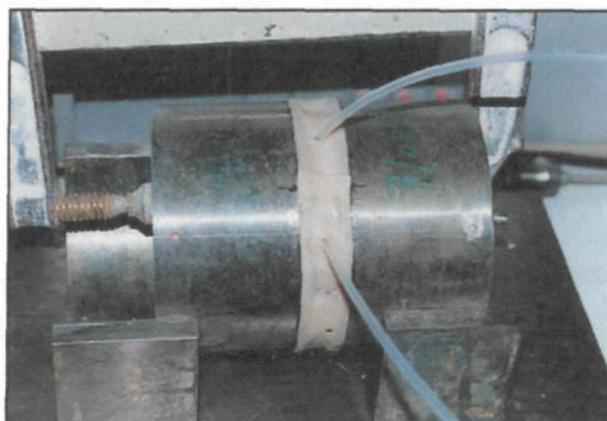


Photo A3.10: Installation des tuyaux de récupération

Préparation des répliques pour les essais hydromécaniques en cisaillement (Deuxième phase, 1996)

A3.8. Modifications apportées en 1996

Trois modifications ont été apportées lors de la préparation des répliques en 1996.

Espace de collage

Lors des essais de 1995, l'espace de collage était très restreinte sur le tubage d'acier. Ceci amenait un collage très difficile et très fragile lors du cisaillement. Pour remédier à ce problème, nous avons fait réusinier les croissants de la machine de cisaillement afin d'avoir 2 mm de plus sur chaque tube pour le collage du système de captage.

Colmatage entre tube et mortier

Lors des essais de 1995, nous avons remarqué, à un degré différent, la perte d'eau par infiltration entre le tube et le mortier. Nous avons annulé ce problème en 1996 en colmatant efficacement l'espace entre le tube et le mortier.

Ajout de tuyaux de captage

Étant donné que nous avons augmenté le débit d'injection en 1996, il fallait augmenter les sorties de secteurs de captage afin de ne pas créer une pression. Nous avons ajouté un tuyau d'évacuation par secteur de captage. Cela fait au total deux tuyaux d'évacuation par secteur de captage, pour un total de 16 tuyaux pour l'ensemble de la fracture.

ANNEXE 4
SYSTÈME D'INJECTION

ANNEXE 4

SYSTÈME D'INJECTION

A4.1 Description du système d'injection de 1996

Pour la gamme de débit recherché (0 à 10 l/h), nous n'avons pas trouvé de pompe et débitmètre chez les commerçants. Pour le moment sur le marché, nous retrouvons soit des équipements pour les faibles débits ou pour les forts débits. Pour palier ce problème, nous avons développé notre propre système d'injection.

Ce système est composé d'un injecteur d'acide, d'une règle optique, d'un compteur, d'une micro-vanne de régulation électro-pneumatique, d'un P.I.D., d'un manomètre et des capteurs de pression (figure A4.1).

Injecteur d'acide:

L'injecteur d'acide d'un volume interne de 4 litres et ayant une pression maximum de service de l'ordre de 50 bars remplacera la pompe volumétrique par l'intermédiaire du réseau d'air comprimé (0-15 bar) du BRGM. Cet injecteur étant disponible au laboratoire du BRGM.

Détendeur d'air 1:

La pression pneumatique agissant sur la face inférieure du vérin de l'injecteur sera régulée en entrée par un détendeur (0-20 bars)

Règle optique + compteur:

Le débit sortant sera mesuré au moyen d'un capteur de déplacement suivant la translation de l'axe du vérin. Considérant l'étendue de mesure et la résolution nécessaire au dispositif, nous avons retenu la règle optique pour mesurer cette translation. Un compteur électronique avec une alimentation de 5 VDC permet d'avoir une sortie analogique du débit.

Micro-vanne de régulation et P.I.D.:

Le débit sortant peut être régulé par une micro-vanne de régulation électro-pneumatique jumelé à un P.I.D.

Détendeur d'air 2:

La micro-vanne de régulation électro-pneumatique a besoin pour fonctionner d'un détendeur 0-5 bars.

Manomètre:

Un manomètre de 0-20 bars a été posé à la sortie du tableau d'injection. Cette mesure de pression approximative nous permettra de choisir le capteur de pression adéquat lors d'un cycle d'injection.

A4.2 Limite du système d'injection:

Avec ce système, nous pouvons injecté dans la gamme de débit .2 à 9.5 l/h. La pression maximum mesuré dans la fracture ne peut dépassé celle de la poussée du vérin de l'injecteur; soit 15 bars. Le volume utile d'injection est de 4 litres.

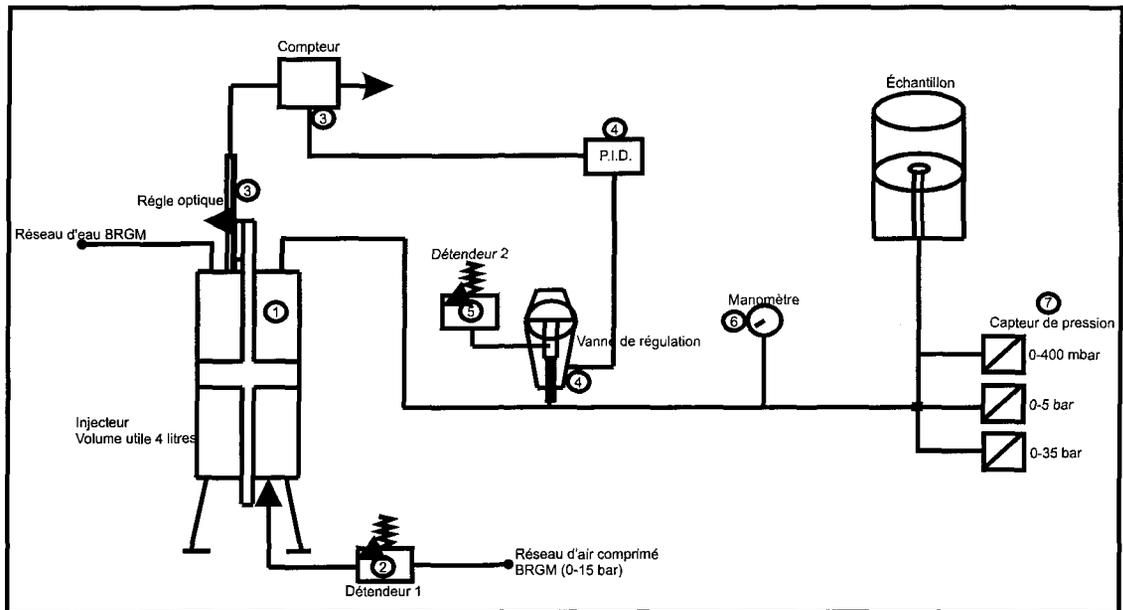


Figure A4.1 : Schéma du système d'injection

ANNEXE 5
MISE EN PLACE DES RÉPLIQUES

ANNEXE 5

MISE EN PLACE DES RÉPLIQUES

Cette annexe présente les résultats des mises en place sous la presse Walter établi dans le protocole du chapitre 3. Pour chaque essai, on y note 3 à 4 cycles de chargement déchargement avec mesure de la fermeture résiduelle irréversible finale.

Tableau A5.1: Mise en place des répliques

No essai	Cycle	Fermeture résiduelle irréversible finale (um)
2	1	16,6
	2	12
	3	9,5
	4	10,5
4	1	28,7
	2	17
	3	11
	4	10
5	1	15
	2	8,5
	3	10,5
9	1	48,3
	2	23,1
	3	19,1
	4	8
	5	11
11	1	8,4
	2	4,5
	3	4
	4	4,5
12	1	4
	2	7,5
	3	6
	4	5
13	1	24,6
	2	20,6
	3	14,6
	4	14
15	1	9
	2	6,5
	3	4
17	1	34,2
	2	15
	3	11,5
	4	16,6
18	1	19,6
	2	9
	3	5,5
	4	4,5
19	1	4
	2	4,5
	3	3
	4	5
20	1	5,5
	2	6
	3	4,5
	4	3,5

ESSAI DE DÉFORMABILITÉ MONOAXIALE
Test 1, 2, 3, 4; réplique No: 17

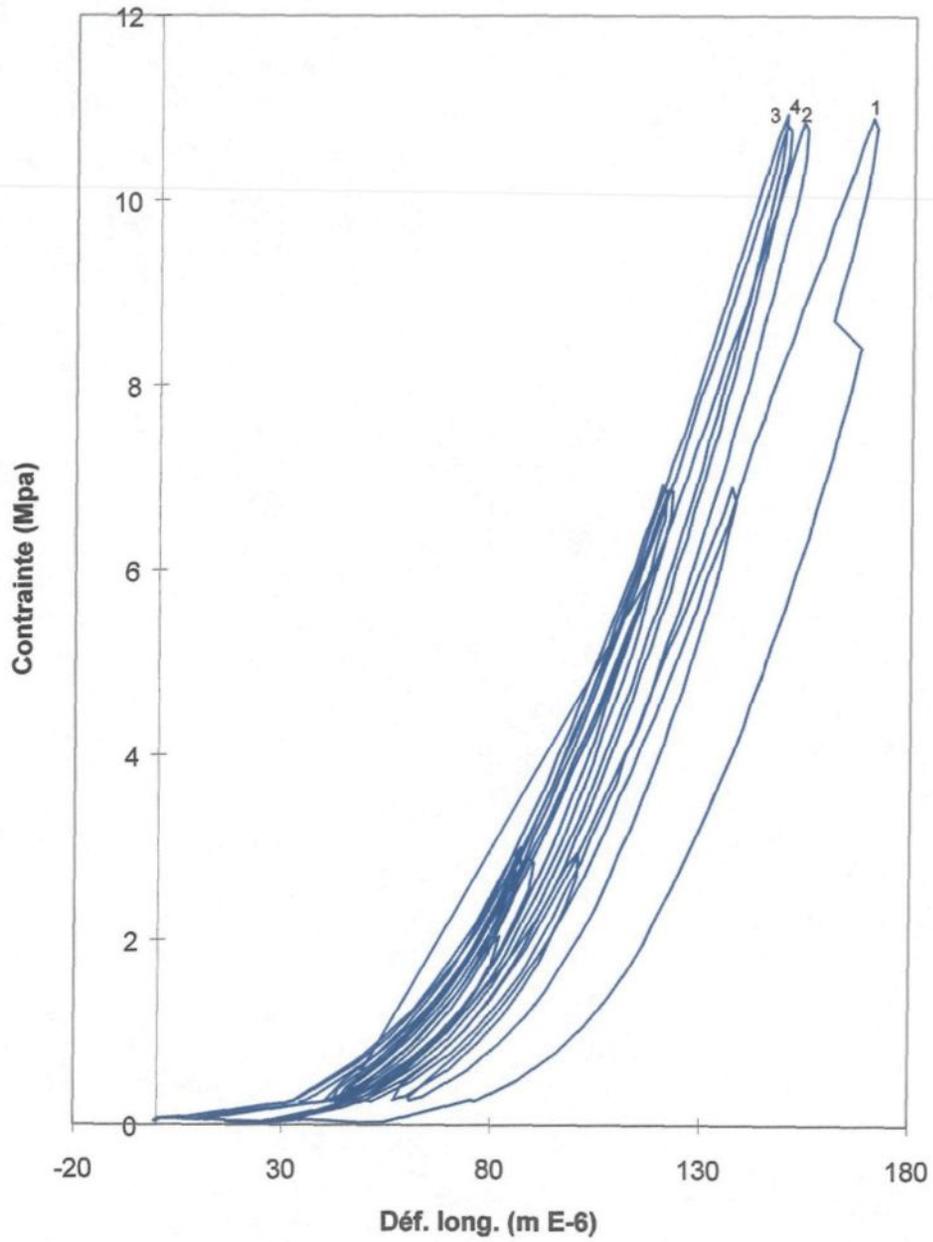


Figure A5.1: Exemple des courbes de déformabilité de la réplique no 17

ANNEXE 6
ÉTALONAGE ET PRÉCISION

ANNEXE 6

ÉTALONAGE ET PRÉCISION

LISTE DU MATÉRIEL UTILISÉ DANS LES ESSAIS D'HYDROMÉCANIQUES

Numéro_AQ	Description	Marque	Type	Gamme/EM	Classe de précision % de l'EM
LGC013	Presse cisaillement roches	BRGM/ANTEA			
LGC013A	Capteur de dép. + cond.	SENSOREX	SX12K020	20 mm	0,3
LGC013B	Capteur de dép. + cond.	SENSOREX	SX12K020	20 mm	0,3
LGC013C	Capteur de dép. + cond.	SENSOREX	SX12K060	50 mm	0,3
LGC013D	Capteur pres. + cond.	Traninstruments	BHL-4241-00	0-40000 kPa	0,3
LGC013E	Capteur pres. + cond.	Traninstruments	BHL-4241-00	40 MPa	0,3
LGC013F	Capteur pres. + cond.	Jauge application	PRIMA 35.1	0-3500 kPa	0,5
LGC013G	Capteur pres. + cond.	Schaevitz	P7210001	0-500 kPa	0,5
LGC013H	Capteur pres. + cond.	Keller	PR-41	0-400 mbar	0,2
LIF013	Ord. HP9000 MOD217	Hewlett-Packard	9817A		
LME013	Centrale de mesure	Hewlett-Packard	3852A	V-R DC	0,-5
LCP011	Capteur Débit +cond.	Heidenhain	LS476	270 mm(0-10 l/h)	0,3
LCP123	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
LCP124	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
LCP125	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
LCP126	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
LCP127	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
LCP128	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
LCP129	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
LCP130	Capteur force	DS EUROPE	535Q	6 daN	0,05
	Inclinomètre	TME	magnéto-résistif	= + - 10	0,3
LGC001	Presse hyd. 2000 kN	MFL	BPP5	2000 kN	0,2
LCP005B	Capteur de dép. + cond.	SENSOREX	SX12K010-05	2,5 mm	0,3
LCP010	Capteur de dép. + cond.	SENSLINE	CXI-17-F5	2,5 mm	0,3

Liste des capteurs vérifiés sur le banc de cisaillement LGC013

LGC013A	Capteur de dép. + cond.	SENSOREX
LGC013B	Capteur de dép. + cond.	SENSOREX
LGC013C	Capteur de dép. + cond.	SENSOREX
LGC013D	Capteur pres. + cond.	Traninstruments
LGC013E	Capteur pres. + cond.	Traninstruments
LGC013F	Capteur pres. + cond.	Jauge application
LGC013G	Capteur pres. + cond.	Schaevitz
LCP123	Capteur force	DS EUROPE
LCP124	Capteur force	DS EUROPE
LCP125	Capteur force	DS EUROPE
LCP126	Capteur force	DS EUROPE
LCP127	Capteur force	DS EUROPE
LCP128	Capteur force	DS EUROPE
LCP129	Capteur force	DS EUROPE
LCP130	Capteur force	DS EUROPE

ANTEA

Direction de la géotechnique
QUALITE

Date : 13 Sept 95
Opérateur : C. POINCLOU

Vérification/étalonnage capteur de déplacement

PV N° : GC013A95

APPAREIL CONTROLE :

Marque : SENSOREX
Type : SX12 K020
N°série : 0131
Classe :

Capteur n° : LGC013A

Affectation : LGC013

MATERIEL DE REFERENCE :

- Vis micrométrique MITUTOYO n°: LME130
- Multimètre de référence FLUKE 8505A n° : LME113

RESULTATS :

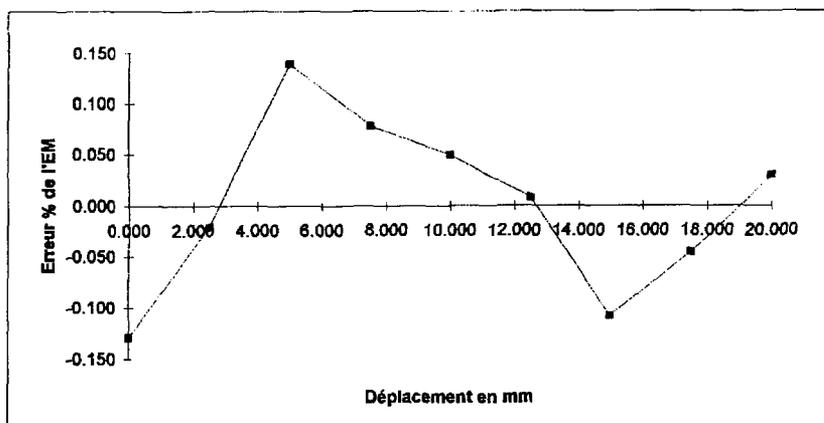
EM= 20 mm

Réf. vis (mm)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (mm)
0.000	0.0001	-0.129	0.000
2.500	1.2377	-0.021	2.463
5.000	2.4803	0.139	4.944
7.500	3.7012	0.078	7.383
10.000	4.9253	0.049	9.828
12.500	6.1482	0.008	12.272
15.000	7.3637	-0.108	14.701
17.500	8.5967	-0.046	17.164
20.000	9.8311	0.030	19.631

Pente droite : 2.0376 mm/V
Origine : -0.0261 mm

Précision : 0.154 % EM

Câblage capteur *1 *3
 *2 *4

OBSERVATIONS :**COURBE DE LINEARITE ET HYSTERESIS :**

ANTEA

Direction de la géotechnique
QUALITE

Date : 12 Sept 95
Opérateur : C. POINCLOU

Vérification/étalonnage capteur de déplacement

PV N° : GC013B95

APPAREIL CONTROLE :

Marque : SENSOREX
Type : SX12K020
N°série : 0132
Classe :

Capteur n° : LGC013B
Affectation : LGC013

MATERIEL DE REFERENCE :

- Vis micrométrique MITUTOYO n°: LME130
- Multimètre de référence FLUKE 8505A n° : LME113

RESULTATS :

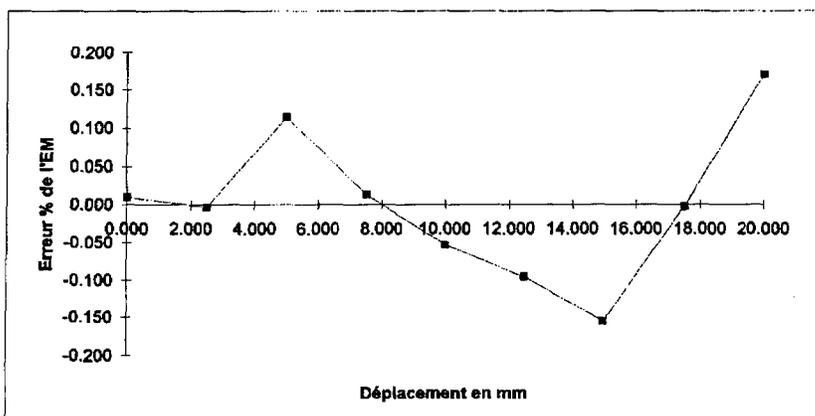
EM= 20 mm

Réf. vis (mm)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (mm)
0.000	0.0000	0.010	-0.017
2.500	1.2094	-0.003	2.398
5.000	2.4315	0.115	4.836
7.500	3.6324	0.014	2.235
10.000	4.8366	-0.053	9.637
12.500	6.0432	-0.096	12.047
15.000	7.2481	-0.155	14.452
17.500	8.4736	-0.003	16.898
20.000	9.7011	0.171	19.350

Pente droite : 2.0649 mm/V
Origine : 0.0021 mm

Précision : 0.186 % EM

Câblage capteur *1 *3
*2 *4

OBSERVATIONS :**COURBE DE LINEARITE ET HYSTERESIS :**

ANTEADirection de la géotechnique
QUALITE

Date : 3 Octobre 1995

Opérateur : C. POINCLOU

Vérification/étalonnage capteur de pression

PV N° : 95 LGC013F

APPAREIL CONTROLE :

Marque : JA
 Type : PRIMA 35.1
 N°série :
 Classe :

Capteur n° : LGC013F

Affectation : LGC013

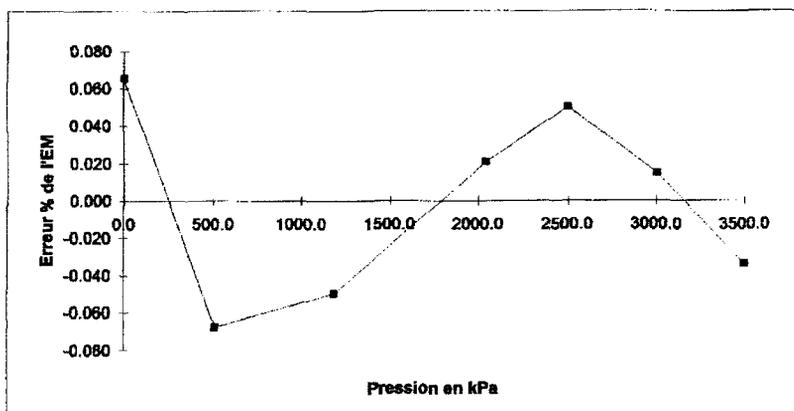
MATERIEL DE REFERENCE :

- Dispositif n° : LME 120 6000 KPa
 Chaîne d'acquisition : HP 217 + centrale HP3852 LME013 + UPM60

RESULTATS :

EM= 3500 kPa

Réf. P (kPa)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (kPa)
0.0	0.0002	0.066	
1190.0	0.5137	-0.050	
2040.0	0.8829	0.021	
2500.0	1.0825	0.050	
3000.0	1.2985	0.015	
3500.0	1.5143	-0.034	



ANTEADirection de la géotechnique
QUALITEDate : 17 Octobre 95
Opérateur: POINCLOU C.**Vérification/étalonnage capteur de force****PV N° : 95b LCP 124****APPAREIL CONTROLE :**

Marque : DS EUROPE

Capteur n° : LCP 124

Type : 535Q

N°série : 3994

Affectation : LGC 013

Classe :

UPM60 sur DC(5 Volts)

MATERIEL DE REFERENCE :

- Capteur de FORCE N° : poids mesurés à + - .02 gr

-Chaîne d'acquisition : micro HP 217. LIF013 + centrale HP3852 LME013 + UPM60

RESULTATS :

EM= 0.05 kN

Réf. F (kN)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (daN)
0.000	0.0000	0.004	
0.010	0.0184	-0.002	
0.020	0.0368	-0.008	
0.030	0.0552	0.005	
0.040	0.0736	0.005	
0.050	0.0920	-0.003	

Pente droite	: 0.5433239 kN/V
Origine	: 0.000 kN

Précision	: 0.048 % EM
-----------	--------------

ANTEADirection de la géotechnique
QUALITEDate : 17 Octobre 95
Opérateur: POINCLOU C.**Vérification/étalonnage capteur de force****PV N° : 95b LCP 126****APPAREIL CONTROLE :**

Marque : DS EUROPE
 Type : 535Q
 N°série : 7819
 Classe :
 UPM 60 sur DC(5Volts)

Capteur n° : LCP 126

Affectation : LGC 013

MATERIEL DE REFERENCE :

- Capteur de FORCE N° : poids mesurés à + - .02 gr
 - Chaîne d'acquisition : micro HP 217, LIF013 + centrale HP3852 LME013 + UPM60

RESULTATS :

EM= 0.05 kN

Réf. F (kN)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (daN)
0.000	0.0000	0.018	
0.010	0.0183	0.002	
0.020	0.0367	-0.009	
0.030	0.0550	-0.020	
0.040	0.0734	-0.032	
0.050	0.0918	0.041	

Pente droite : 0.5448155 kN/V
 Origine : 0.000 kN

Précision : 0.081 % EM

ANTEADirection de la géotechnique
QUALITEDate : 17 Octobre 95
Opérateur: POINCLOU C.**Vérification/étalonnage capteur de force**

PV N° : 95b LCP 127

APPAREIL CONTROLE :Marque : DS EUROPE
Type : 535Q
N°série : 7876
Classe :
UPM60 sur DC (5 Volts)

Capteur n° : LCP 127

Affectation : LGC 013

MATERIEL DE REFERENCE :- Capteur de FORCE N° : poids mesurés à + - .02 gr
- Chaîne d'acquisition : micro HP 217. LIF013 + centrale HP3852 LME013 + UPM60**RESULTATS :**

EM= 0.05 kN

Réf. F (kN)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (daN)
0.000	0.0000	0.001	
0.010	0.0184	-0.010	
0.020	0.0368	0.007	
0.030	0.0552	0.004	
0.040	0.0736	0.003	
0.050	0.0920	-0.006	

Pente droite : 0.5432623 kN/V
Origine : 0.000 kN

Précision : 0.050 % EM

ANTEA

Direction de la géotechnique
QUALITE

Date : 17 Octobre 95
Opérateur: POINCLOU C.

Vérification/étalonnage capteur de force

PV N° : 95b LCP 128

APPAREIL CONTROLE :

Marque : DS EUROPE
Type : 535Q
N°série : 7884
Classe :
UPM60 sur DC (5 Volts)

Capteur n° : LCP 128

Affectation : LGC 013

MATERIEL DE REFERENCE :

- Capteur de FORCE N° : poids mesurés à +- .02 gr
- Chaîne d'acquisition : micro HP 217. LIF013 + centrale HP3852 LME013 + UPM60

RESULTATS :

EM= 0.05 kN

Réf. F (kN)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (daN)
0.000	0.0000	-0.005	
0.010	0.0180	0.000	
0.020	0.0360	0.002	
0.030	0.0540	0.010	
0.040	0.0720	0.000	
0.050	0.0899	-0.007	

Pente droite : 0.5558979 kN/V
Origine : 0.000 kN

Précision : 0.050 % EM

ANTEA
 Direction de la géotechnique
 QUALITE

Date : 17 Octobre 95
 Opérateur: POINCLOU C.

Vérification/étalonnage capteur de force

PV N° : 95b LCP 129

APPAREIL CONTROLE :

Marque : DS EUROPE
 Type : 535Q
 N°série : 7895
 Classe :

Capteur n° : LCP 129

Affectation : LGC 013

UPM60 sur DC (5 Volts)

MATERIEL DE REFERENCE :

- Capteur de FORCE N° : poids mesurés à +- .02 gr

-Chaîne d'acquisition : micro HP 217. LIF013 + centrale HP3852 LME013 + UPM60

RESULTATS :

EM= 0.05 kN

Réf. F (kN)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (daN)
0.000	0.0000	0.011	
0.010	0.0185	-0.019	
0.020	0.0370	0.002	
0.030	0.0555	0.002	
0.040	0.0741	0.015	
0.050	0.0925	-0.010	

Pente droite : 0.5401442 kN/V
 Origine : 0.000 kN

Précision : 0.059 % EM

ANTEA
 Direction de la géotechnique
 QUALITE

Date : 17 Octobre 95
 Opérateur: POINCLOU C.

Vérification/étalonnage capteur de force

PV N° : 95b LCP 130

APPAREIL CONTROLE :

Marque : DS EUROPE
 Type : 535Q
 N°série : 7896
 Classe :
 UPM60 sur DC (5 Volts)

Capteur n° : LCP 130

Affectation : LGC 013

MATERIEL DE REFERENCE :

- Capteur de FORCE N° : poids mesurés à + - .02 gr
 -Chaîne d'acquisition : micro HP 217. LIF013 + centrale HP3852 LME013 + UPM60

RESULTATS :

EM= 0.05 kN

Réf. F (kN)	Lecture (V)	Erreur (% EM)	Affichage (daN)
0.000	0.0000	-0.015	
0.010	0.0185	0.031	
0.020	0.0368	-0.018	
0.030	0.0552	0.001	
0.040	0.0737	0.005	
0.050	0.0921	-0.003	

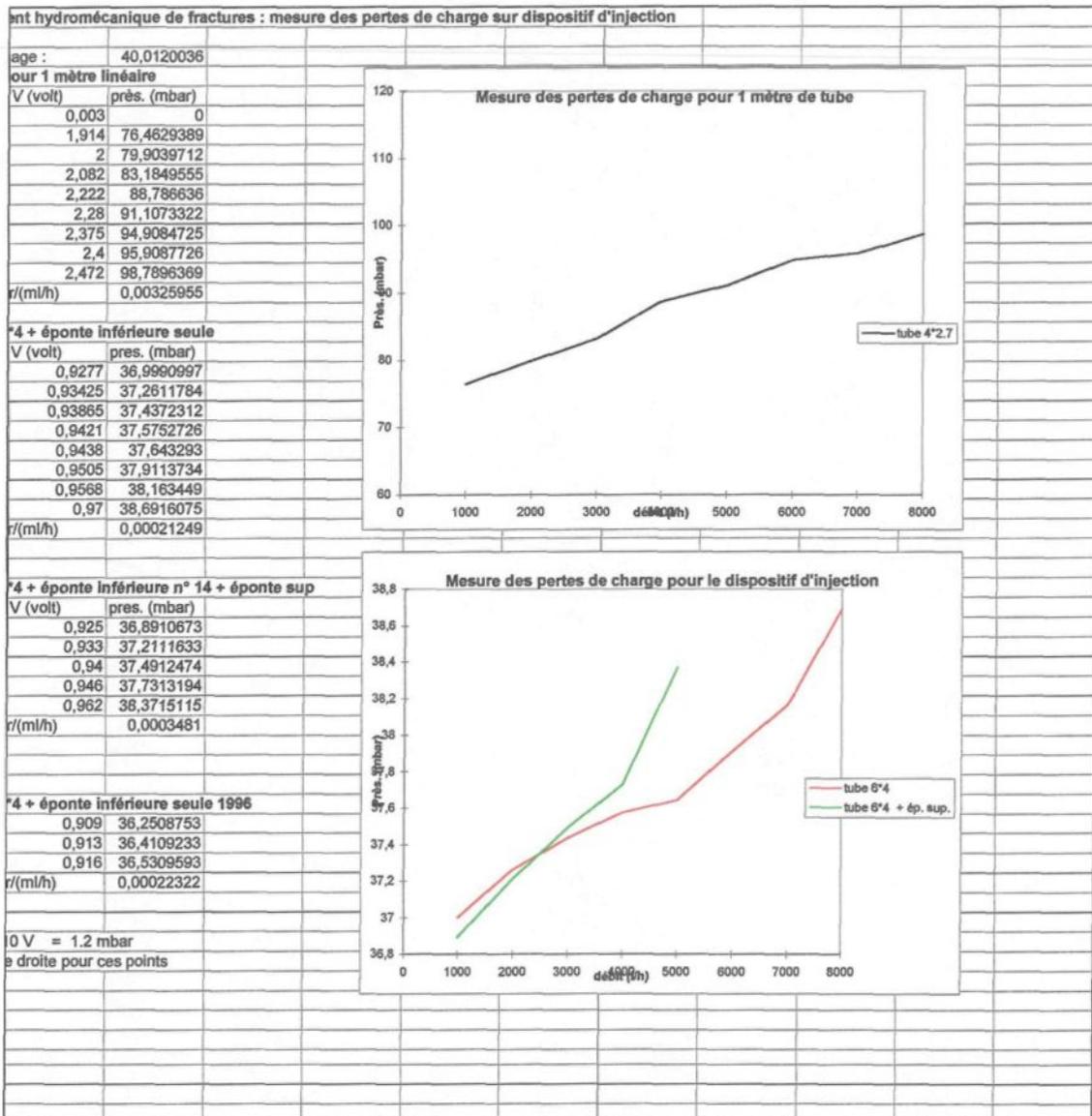
Pente droite : 0.5431416 kN/V
 Origine : 0.000 kN

Précision : 0.071 % EM

ANNEXE 7
PERTE DE CHARGE

ANNEXE 7

PERTE DE CHARGE



ANNEXE 8**BASCULEMENT DE LA DEMI-BOÎTE DE CISAILLEMENT**

ANNEXE 8

BASCULEMENT DE LA DEMI-BOÎTE DE CISAILLEMENT

Suite à la possibilité du basculement de la boîte de cisaillement pendant un essai, nous avons décidé de vérifier ce phénomène plus en détail. Le basculement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement pose un épineux problème, parce qu'il risque d'être néfaste pour notre système de récupération d'eau lors d'un essai de cisaillement hydromécanique (par l'écrasement des tuyaux qui évacuent l'eau).

Nous avons abordé le problème en posant comme hypothèse de départ que la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement n'est pas tirée dans l'axe de la fracture. Notre hypothèse repose sur le fait que le dernier segment de la machine de cisaillement quitte l'axe de la fracture pour aller se souder à la demi-boîte supérieure.

L'idée qui nous est venue pour tester notre hypothèse a été de faire des essais avec des éponges en "PVC" à surface plane (photo A8.1).

Les premiers essais ont révélé un grave problème avec le "P.I.D" (proportionnel, intégral, différentiel). Malgré une consigne de 5 mm en 10 minutes pour le cisaillement, celui-ci s'exécuta en quelques secondes (dérapage). Ceci s'explique par la morphologie

très lisse de la surface des échantillons en "PVC". De plus, ces premiers tests ont montré que la machine a des limites à respecter.

Quant à l'inclinaison de la demi-boîte supérieure calculée à l'aide de l'inclinomètre, considérant les très mauvaises conditions d'expériences, on ne peut tirer aucune constatation. Étant donné la mauvaise régulation avec les surfaces lisses de "PVC", nous avons collé un papier sablé (Métalite P220) à l'interface (photo A8.2).

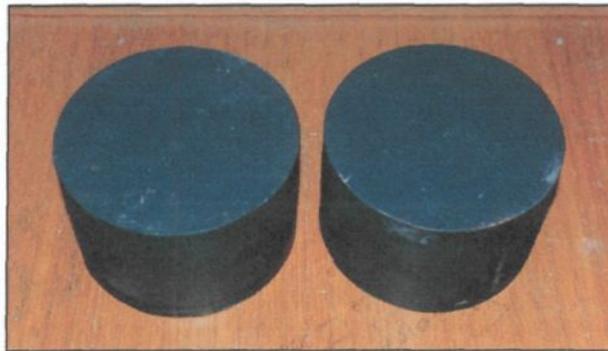


Photo A8.1: Échantillon en PVC

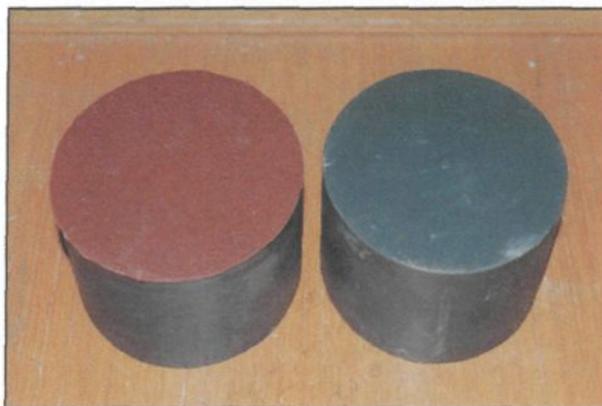


Photo A8.2: Échantillon en PVC avec papier sablé

Les paramètres utilisés sont: une contrainte normale constante 5 Mpa., un déplacement de 5 mm, une durée de 100 minutes. Cette durée plus longue a été appliquée pour aider la servo-valve à suivre la consigne.

Le déroulement de l'essai (PAT 1) a montré une fois de plus des dérapages. Après avoir examiné le papier sablé, une fois l'expérience terminée, on s'est aperçu qu'il était mal collé (photo A8.3). Ce collage non uniforme a réparti les forces sur une petite surface de l'échantillon.

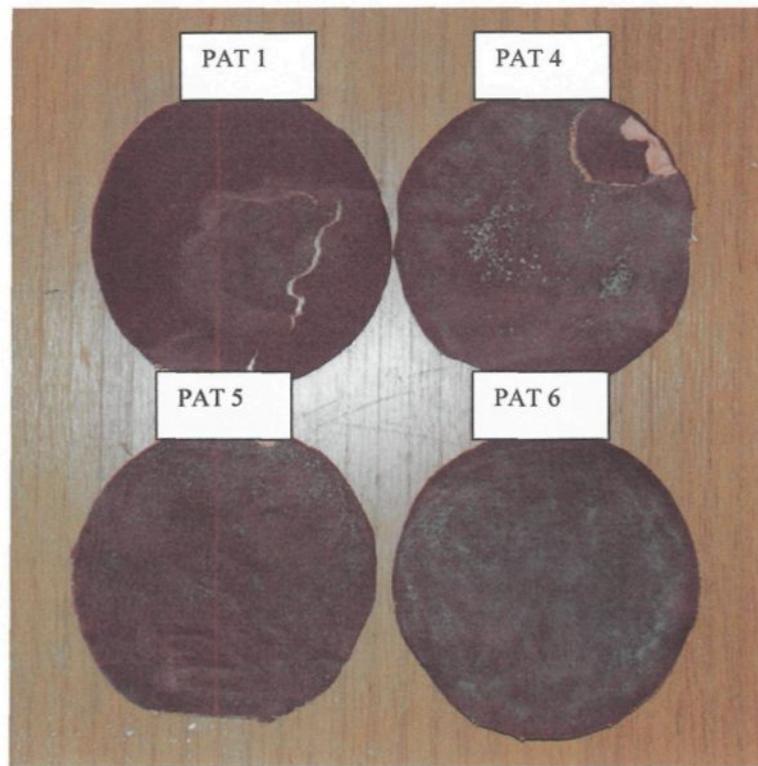


Photo A8.3: Papiers sablés après les essais

L'essai suivant fût effectué dans les mêmes conditions que l'essai précédent avec un collage du papier sablé réparti sur toute la surface. L'essai (PAT 4) se déroula très bien

et le cisaillement a été réparti sur toute la surface du papier sablé (photo A8.3). Le graphique de la figure A8.1 de l'inclinaison en fonction du déplacement montre une ligne droite. Donc, aucun basculement de la demi-boîte supérieure ne se produisit lors de l'essai.

Pour les essais suivants, nous avons installé un deuxième inclinomètre sur le palonnier afin de vérifier sa réaction pendant le cisaillement.

L'essai (PAT 5) fut effectué dans les mêmes conditions que les essais précédents avec un collage du papier sablé réparti sur toute la surface (photo A8.3). Le graphique de la figure A8.2 qui montrent l'inclinaison en fonction du déplacement montrent des lignes droites. Donc, le palonnier semble suivre le cisaillement.

L'essai suivant (PAT6) fut effectué dans les mêmes conditions que les deux essais précédents, mais une durée de cisaillement ramenée de 100 à 10 minutes.

L'essai montra des dérapages (mauvaise régulation). Le graphique de la figure A8.3 de l'inclinaison en fonction du déplacement tangentiel montre un comportement semblable pour les inclinomètres 1 et 2. Donc, le palonnier suit bien la boîte de cisaillement. Pour un essai d'une durée de 100 minutes, la machine réagit très bien alors que pour un essai de 10 minutes la régulation fait défaut.

Conclusions de ces tests:

- 1) Lors d'un essai de cisaillement de surfaces lisses et parallèles, on n'observe aucun plongement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement.
- 2) Des essais faits sur des répliques en béton d'une fracture naturelle montrent un plongement de la demi-boîte supérieure.
- 3) De 1 et 2, on peut déduire que le comportement de la demi-boîte supérieure de la machine de cisaillement est dû à la morphologie de la fracture.

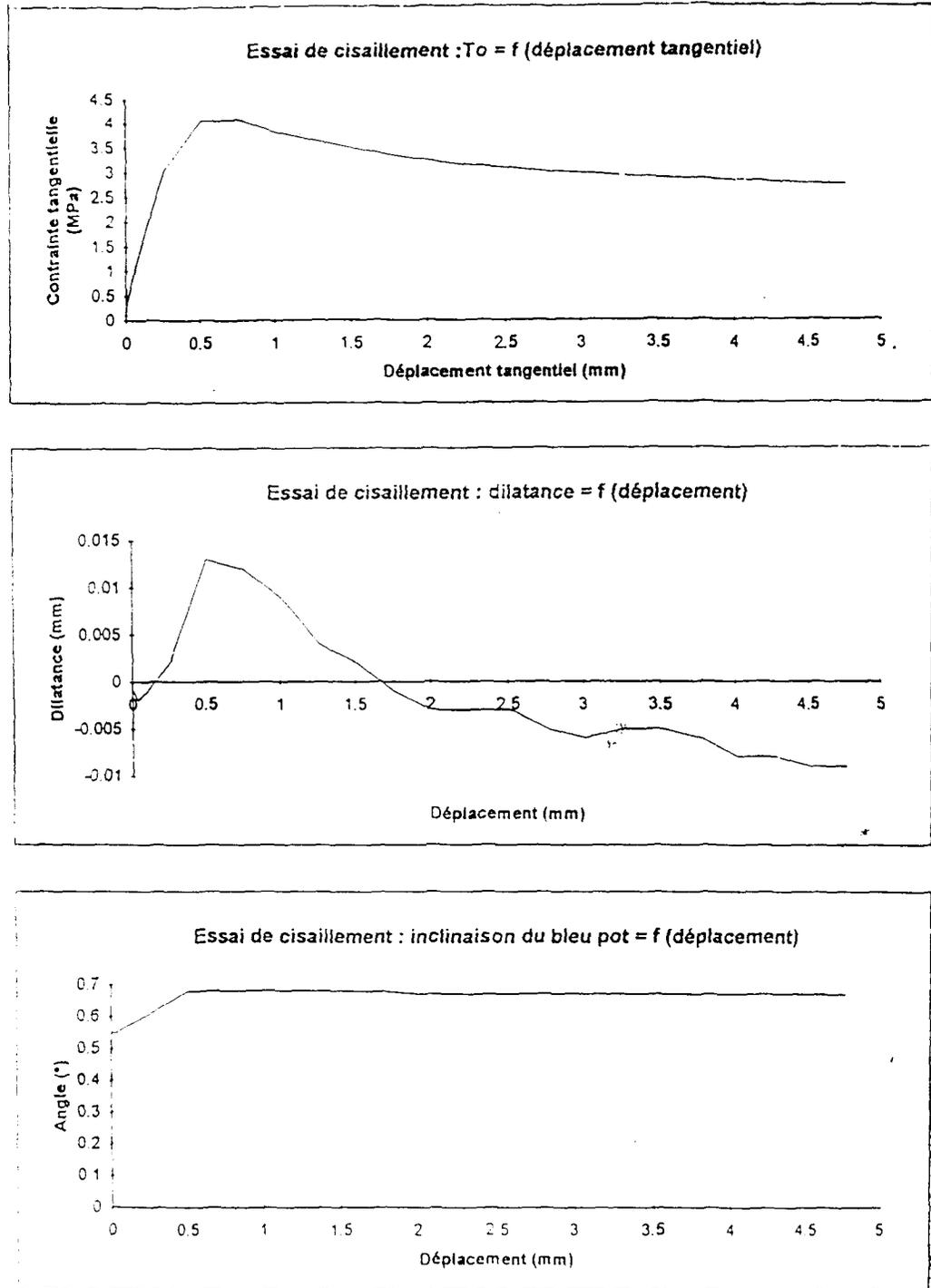


Figure A8.1: Graphiques du comportement mécanique de l'essai PAT4

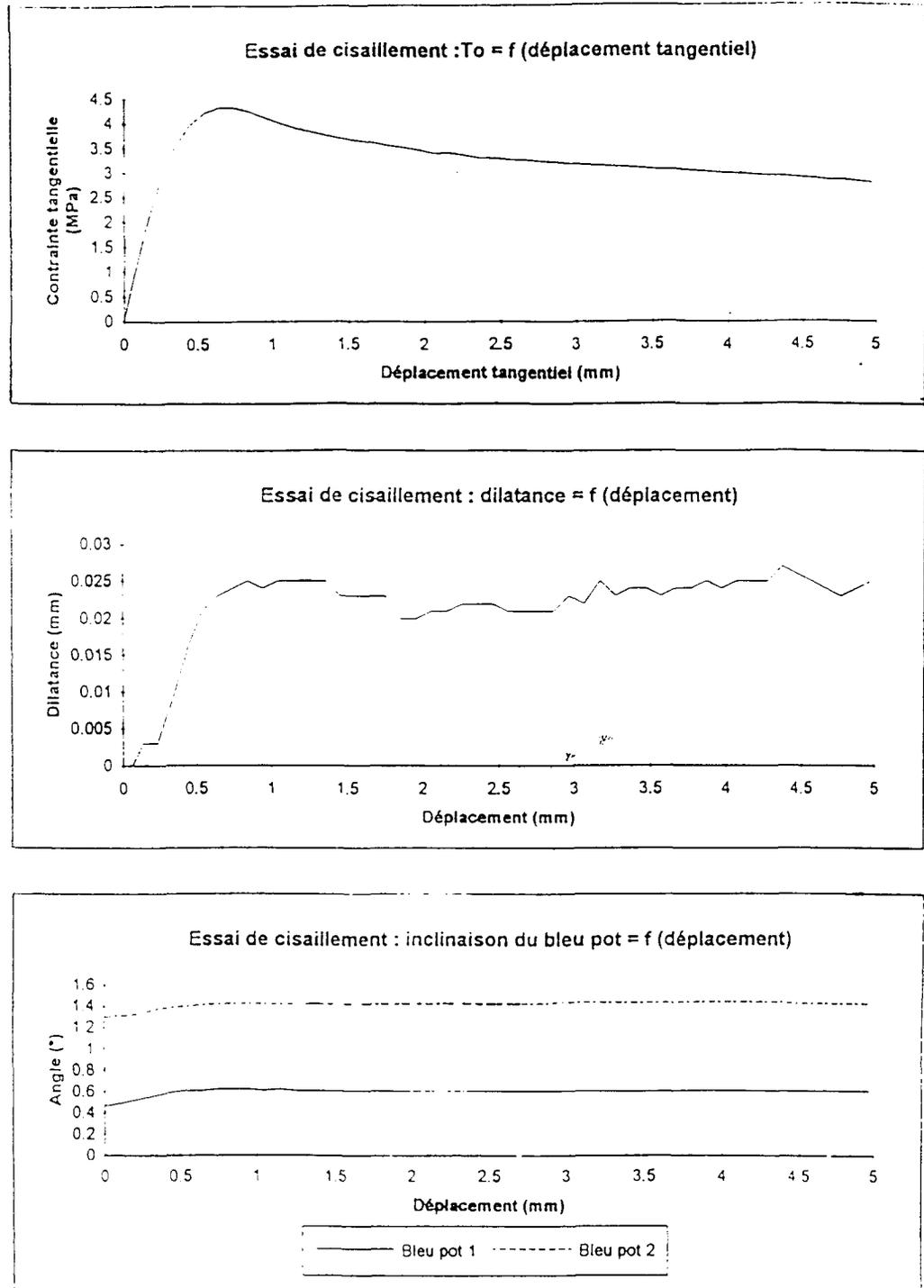


Figure A8.2: Graphiques du comportement mécanique de l'essai PAT5

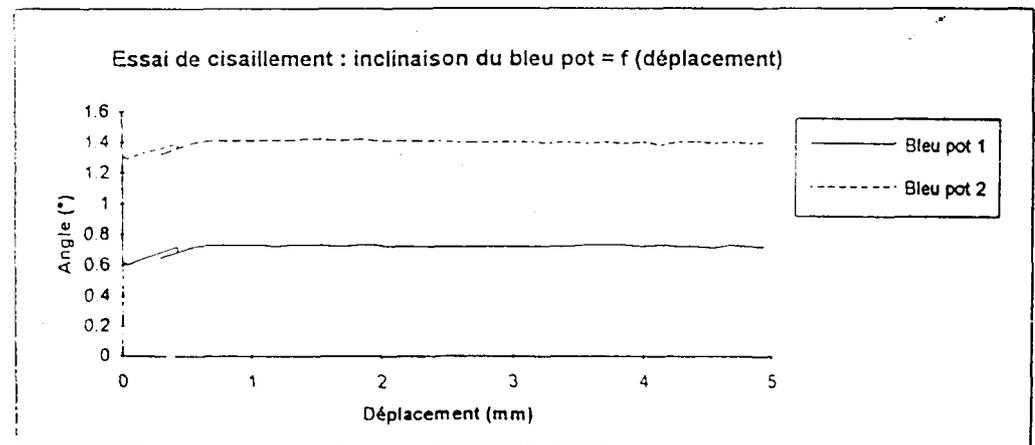
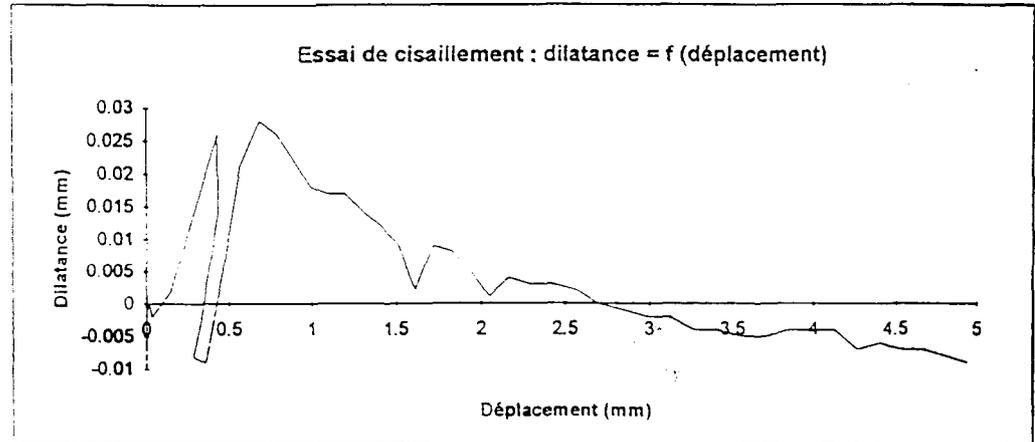
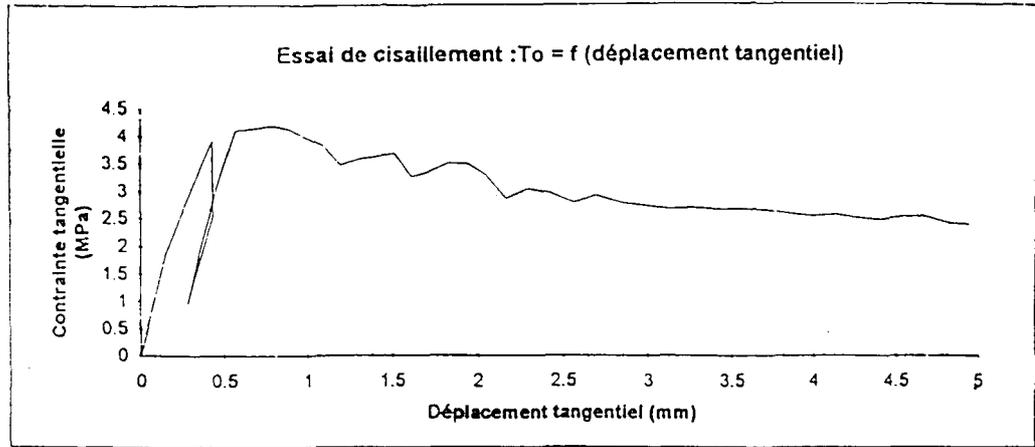


Figure A8.3: Graphiques du comportement mécanique de l'essai PAT6

ANNEXE 9**RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES EN CISAILLEMENT SUR LA
FRACTURE**

ANNEXE 9**RÉSULTATS DES ESSAIS MÉCANIQUES EN CISAILLEMENT SUR LA FRACTURE**

Liens entre le numéro d'essai, la direction de cisaillement et le palier de contrainte normale.

Essai 13, 3 MPa, direction 0°
Essai 12, 3 MPa, direction 90°
Essai 11, 3 MPa, direction 180°
Essai 15, 3 MPa, direction 270°

Essai 6, 5 MPa, direction 0°
Essai 8, 5 MPa, direction 90°
Essai 7, 5 MPa, direction 180°
Essai 10, 5 MPa, direction 270°

Essai 5, 7 MPa, direction 0°
Essai 2, 7 MPa, direction 90°
Essai 9, 7 MPa, direction 180°
Essai 4, 7 MPa, direction 270°

Essai 18, 9 MPa, direction 0°
Essai 20, 9 MPa, direction 90°
Essai 17, 9 MPa, direction 180°
Essai 19, 9 MPa, direction 270°

TABLEAU 9A.1: COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS (1996)

	Essai 13	Essai 12	Essai 11	Essai 15
Contrainte normale	3	3	3	3
Direction	1 (0°)	5 (90°)	3 (180°)	2 (270°)
Résistance au pic (MPa)	3.73	3.23	4.06	4.15
Résistance résiduelle (MPa)	2.42	2.3	2.45	2.75
τ_{res}/τ_{pic}	.65	0.71	0.60	0.66
Δv au pic (mm)	0.185	0.342	0.272	0.200
Δu au pic (mm)	0.035	0.082	0.068	0.052
Contractance Δu (mm)	0.000	0.000	0.000	0.000
Contractance Δv (mm)	0.084	0.094	0.071	0.052
Δv max (mm)	3.045	4.09	3.109	5.075
Δu max (mm)	0.629	.582	0.619	1.225
α (°)	$\Delta v < 0.75$ mm 20.1	$\Delta v < 0.5$ mm 18.9°	$\Delta v < 0.75$ mm 19.2	$\Delta v < 0.5$ mm 22.0°
α (°)	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 13.8	$0.5 < \Delta v < 1.5$ mm 11.7°	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 13.8	$0.5 < \Delta v < 1.5$ mm 18.2°
α (°)	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 8.5	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 7.5°	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 7.9	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 13.3°
α (°)	$2.5 < \Delta v < 3$ mm 5.3	$2.5 < \Delta v < 4$ mm 3.7°	$2.5 < \Delta v < 3$ mm 5.7	$2.5 < \Delta v < 5$ mm 10.5°

TABLEAU 9A.1 (SUITE...) COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS (1996)

	Essai 6	Essai 8	Essai 7	Essai 10
Contrainte normale	5	5	5	5
Direction	1 (0°)	5 (90°)	3 (180°)	2 (270°)
Résistance au pic (MPa)	5.58	5.05	5.35	6.12
Résistance résiduelle (MPa)	3.88	3.6	3.6	4.55
τ_{res}/τ_{pic}	0.70	0.71	0.67	0.74
Δv au pic (mm)	0.5	0.28	0.282	0.411
Δu au pic (mm)	0.041	0.012	0.040	0.086
Contractance Δu (mm)	0.007	0.009	0.002	0.000
Contractance Δv (mm)	0.284	0.173	0.105	0.102
Δv max (mm)	3.957	3.007	5.012	4.023
Δu max (mm)	0.403	.321	0.472	0.732
α (°)	$\Delta v < 1$ mm 12.9	$\Delta v < 0.75$ mm 12.6	$\Delta v < 1$ mm 15.5	$\Delta v < 0.75$ mm 15.9
α (°)	$1 < \Delta v < 2$ mm 9.4	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 7.2	$1 < \Delta v < 2$ mm 7.9	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 13.4
α (°)	$2 < \Delta v < 4$ mm 3.7	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 3.9	$2 < \Delta v < 3$ mm 3.5	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 10.0
α (°)		$2.5 < \Delta v < 3$ mm 1.2	$3 < \Delta v < 5$ mm 1.1	$2.5 < \Delta v < 4$ mm 7.1

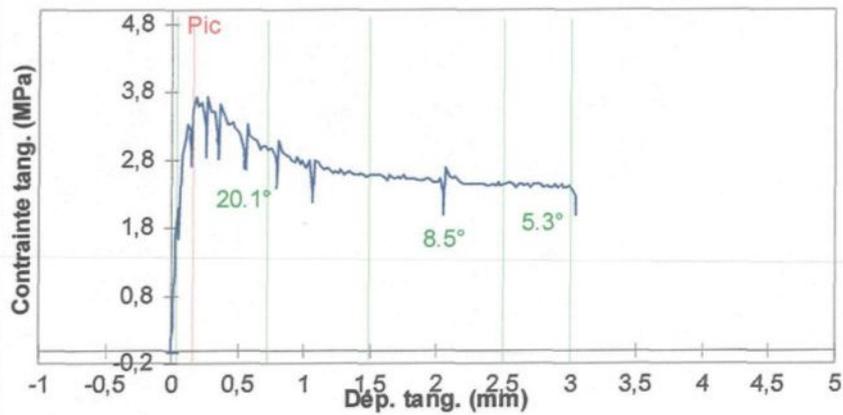
TABLEAU 9A.1 (SUITE...) COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS (1996)

	Essai 5	Essai 2	Essai 9	Essai 4
Contrainte normale	7	7	7	7
Direction	1 (0°)	5 (90°)	3 (180°)	2 (270°)
Résistance au pic (MPa)	6.18	5.77	7.76	6.99
Résistance résiduelle (MPa)	4.95	3.90	5.37	5.15
τ_{res}/τ_{pic}	.80	0.68	0.69	0.74
Δv au pic (mm)	0.239	0.256	0.374	0.347
Δu au pic (mm)	0.027	0.028	0.052	0.08
Contractance Δu (mm)	0.000	0.000	0.002	0.000
Contractance Δv (mm)	0.087	0.126	0.159	0.080
Δv max (mm)	4.012	3.992	3.019	4.099
Δu max (mm)	0.420	0.336	0.308	0.817
α (°)	$\Delta v < 0.75$ mm 13.8	$\Delta v < 0.75$ mm 12.1	$\Delta v < 0.75$ mm 13.7	$\Delta v < 1$ mm 17.1°
α (°)	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 9.8	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 7.8	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 8.3	$1 < \Delta v < 2$ mm 12.5
α (°)	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 4.8	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 3.5	$1.5 < \Delta v < 2$ mm 4.6	$2 < \Delta v < 4$ mm 8.6°
α (°)	$2.5 < \Delta v < 4$ mm 1.6	$2.5 < \Delta v < 4$ mm 1.7	$2 < \Delta v < 3$ mm 2.4	

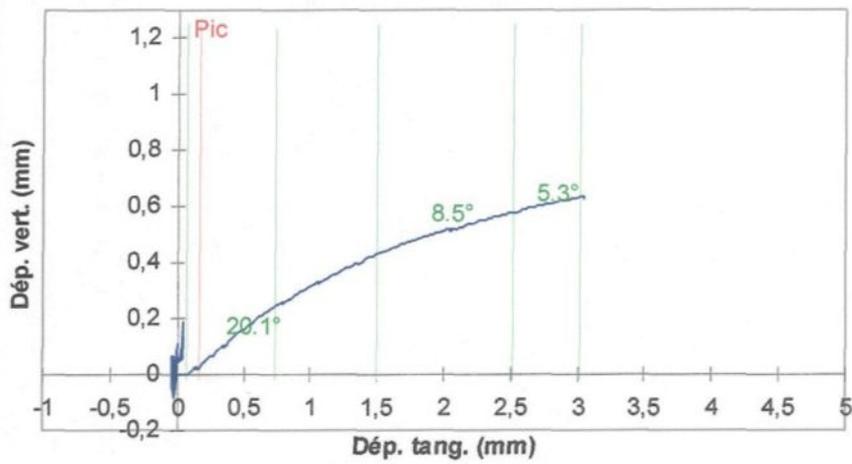
TABLEAU 9A.1 (SUITE...) COMPORTEMENT MECANIQUE DES JOINTS (1996)

	Essai 18	Essai 20	Essai 19	Essai 17
Contrainte normale	9	9	9	9
Direction	1 (0°)	5 (90°)	3 (180°)	2 (270°)
Résistance au pic (MPa)	8.25	7.94	8.71	9.66
Résistance résiduelle (MPa)	6.25	5.80	6.1	7.38
τ_{res}/τ_{pic}	.76	0.73	0.70	0.76
Δv au pic (mm)	0.580	0.396	0.594	0.655
Δu au pic (mm)	0.055	0.026	0.045	0.106
Contractance Δu (mm)	0.006	0.008	0.007	0.006
Contractance Δv (mm)	0.248	0.217	0.349	0.171
Δv max (mm)	4.003	3.996	3.025	4.020
Δu max (mm)	0.271	0.146	0.264	0.572
α (°)	$\Delta v < 1$ mm 10.8	$\Delta v < 0.75$ mm 9.7	$\Delta v < 1$ mm 12.8	$\Delta v < 1$ mm 13.0
α (°)	$1 < \Delta v < 1.5$ mm 8.3	$0.75 < \Delta v < 1.5$ mm 6.1	$1 < \Delta v < 1.5$ mm 9.0	
α (°)	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 4.3	$1.5 < \Delta v < 2.5$ mm 1.9	$1.5 < \Delta v < 2$ mm 5.0	$1 < \Delta v < 2$ mm 10.4
α (°)	$2.5 < \Delta v < 4$ mm 0	$2.5 < \Delta v < 4$ mm -1.5	$2 < \Delta v < 3$ mm 0.2	$2 < \Delta v < 4$ mm 5.8

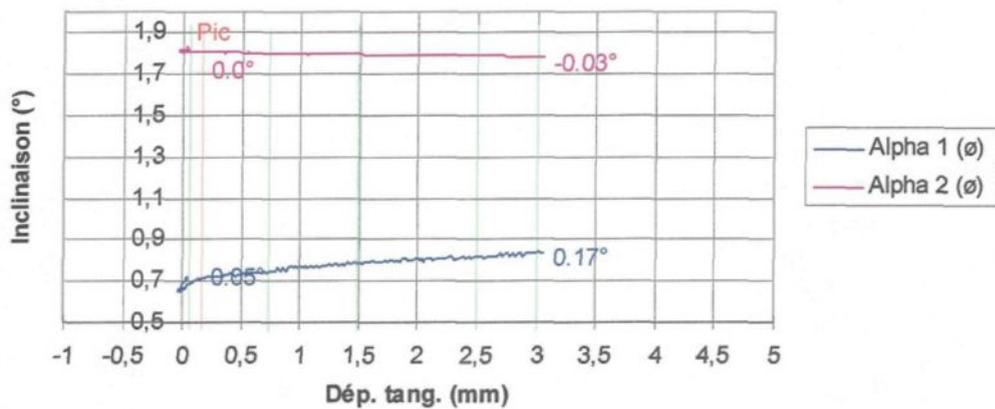
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R13)



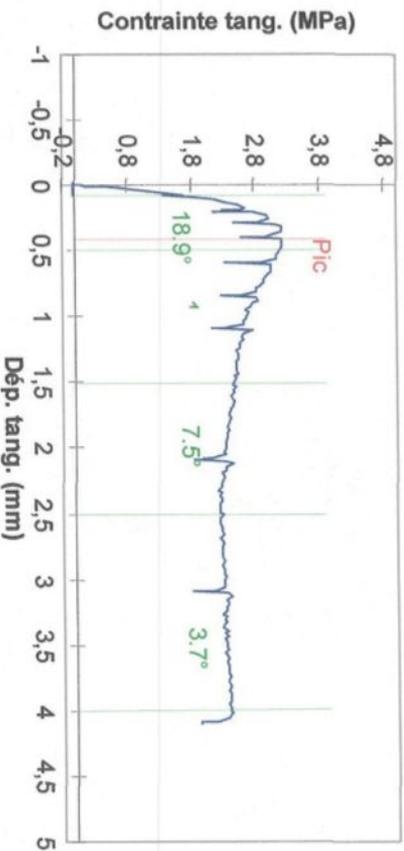
Dilatance (R13, 3 MPa, 0°)



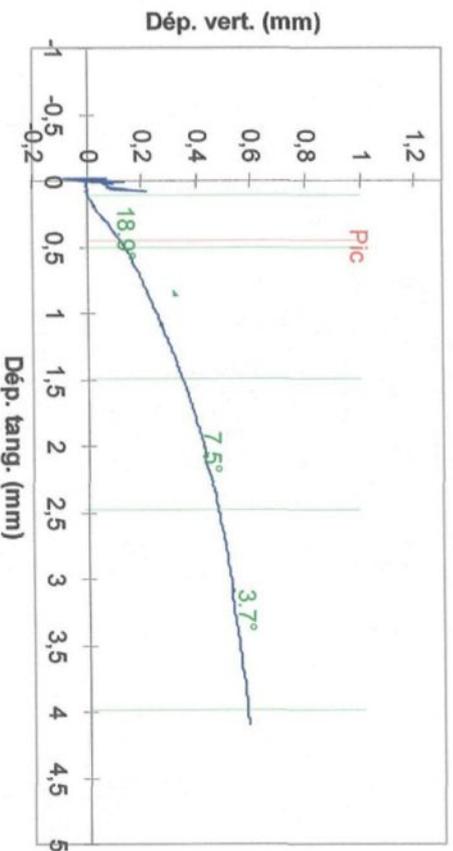
Inclinomètre (R13, 3 MPa, 0°)



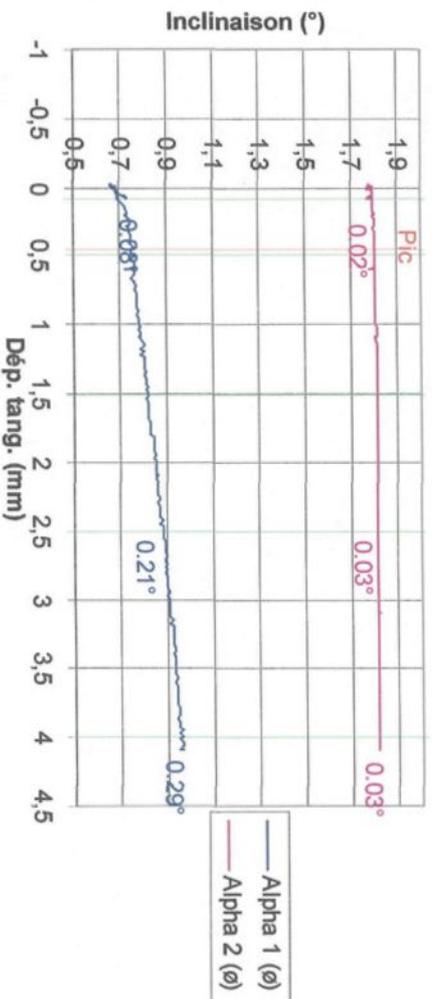
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R12)



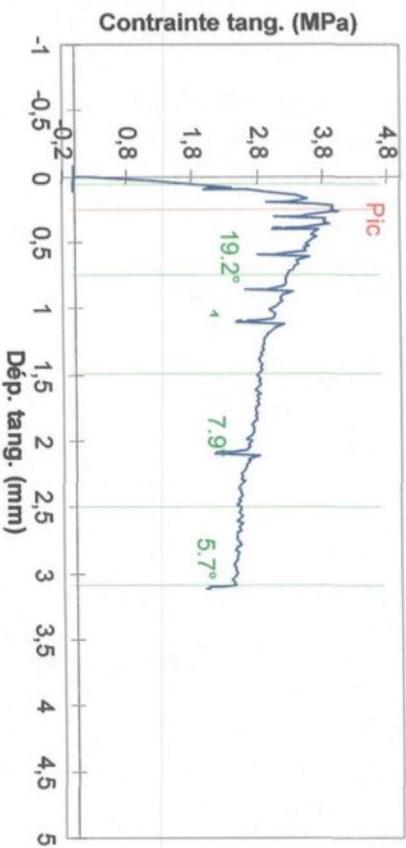
Dilatance (R12, 3 MPa, 90°)



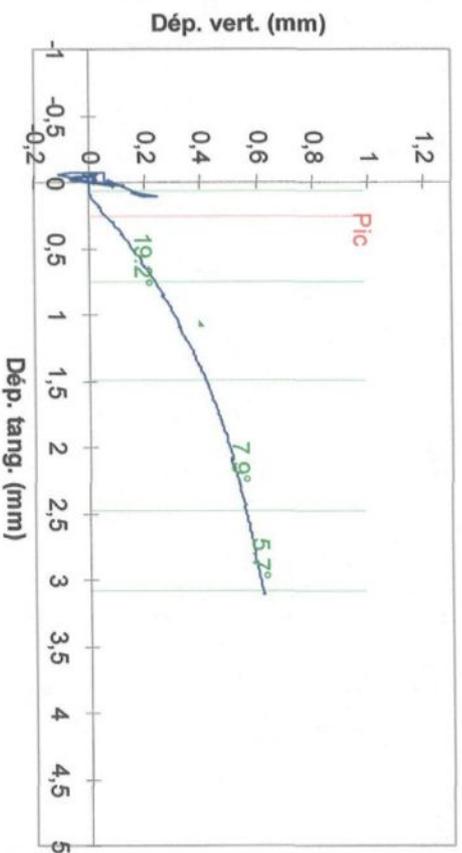
Inclinomètre (R12, 3 MPa, 90°)



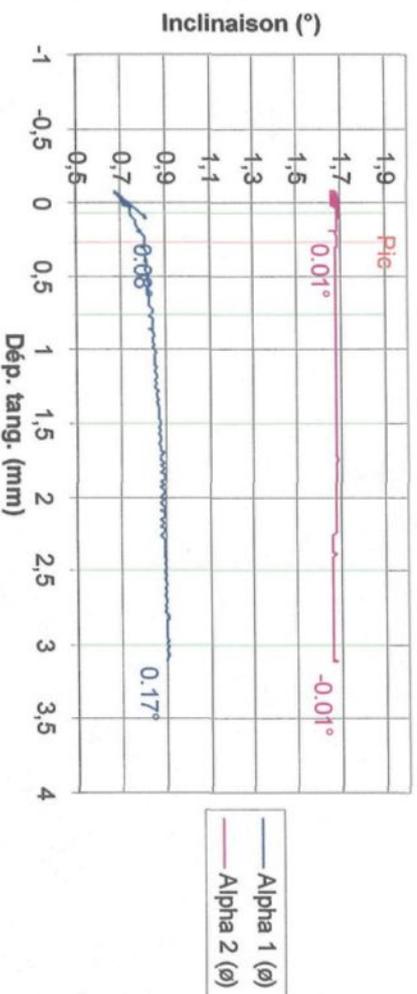
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R11)



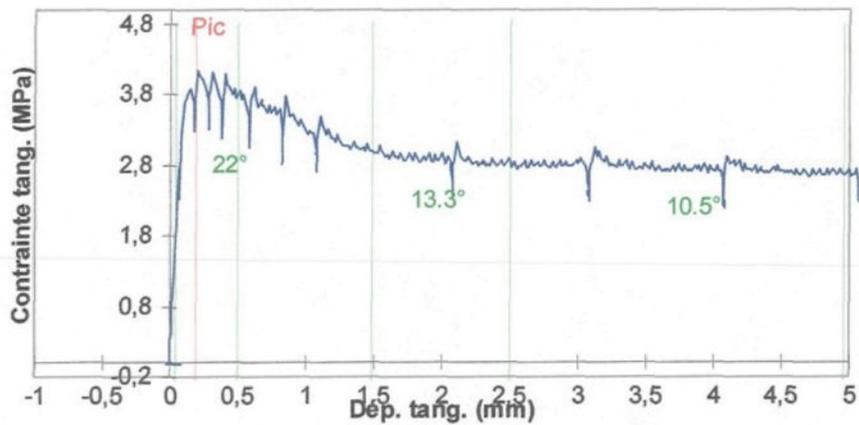
Dilatance (R11, 3 MPa, 180°)



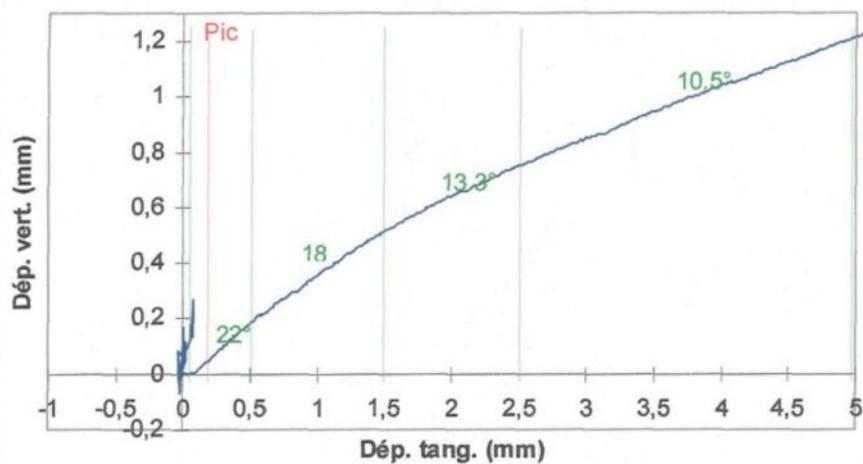
Inclinomètre (R11, 3 MPa, 180°)



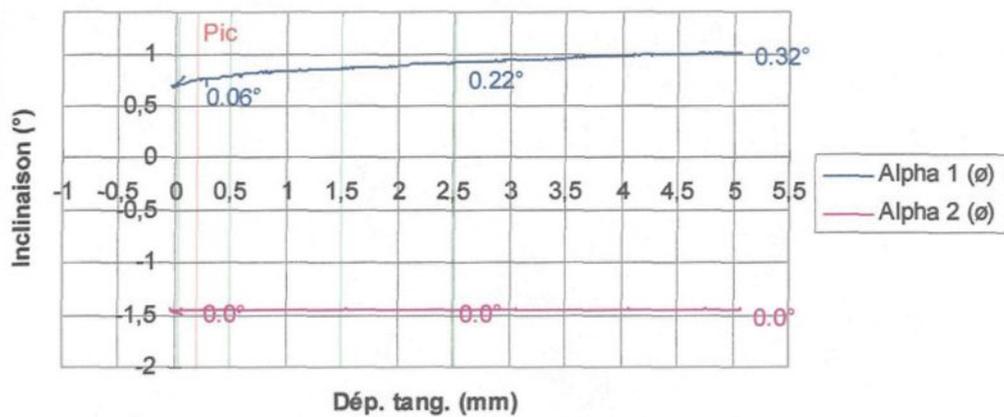
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R15)

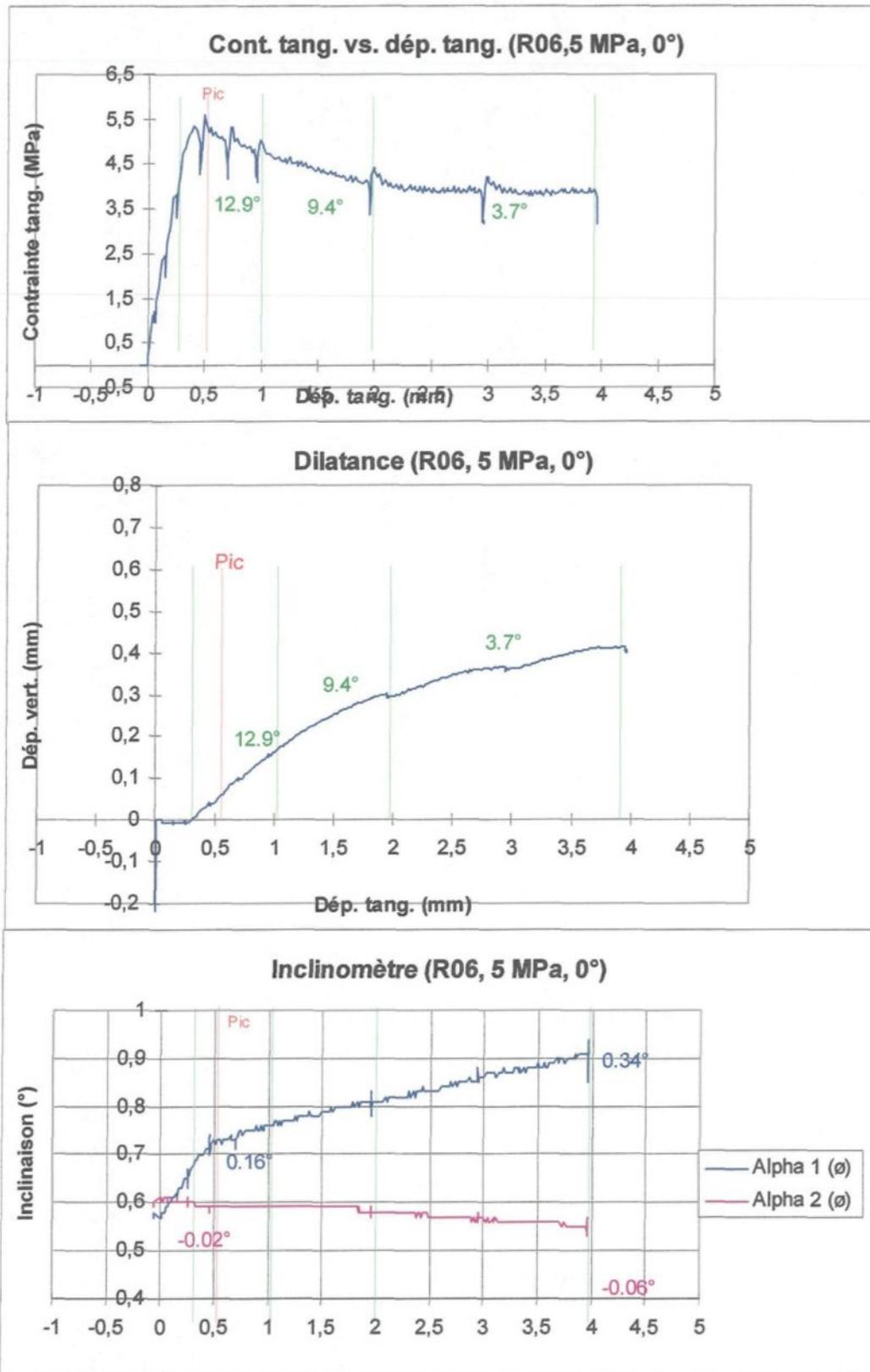


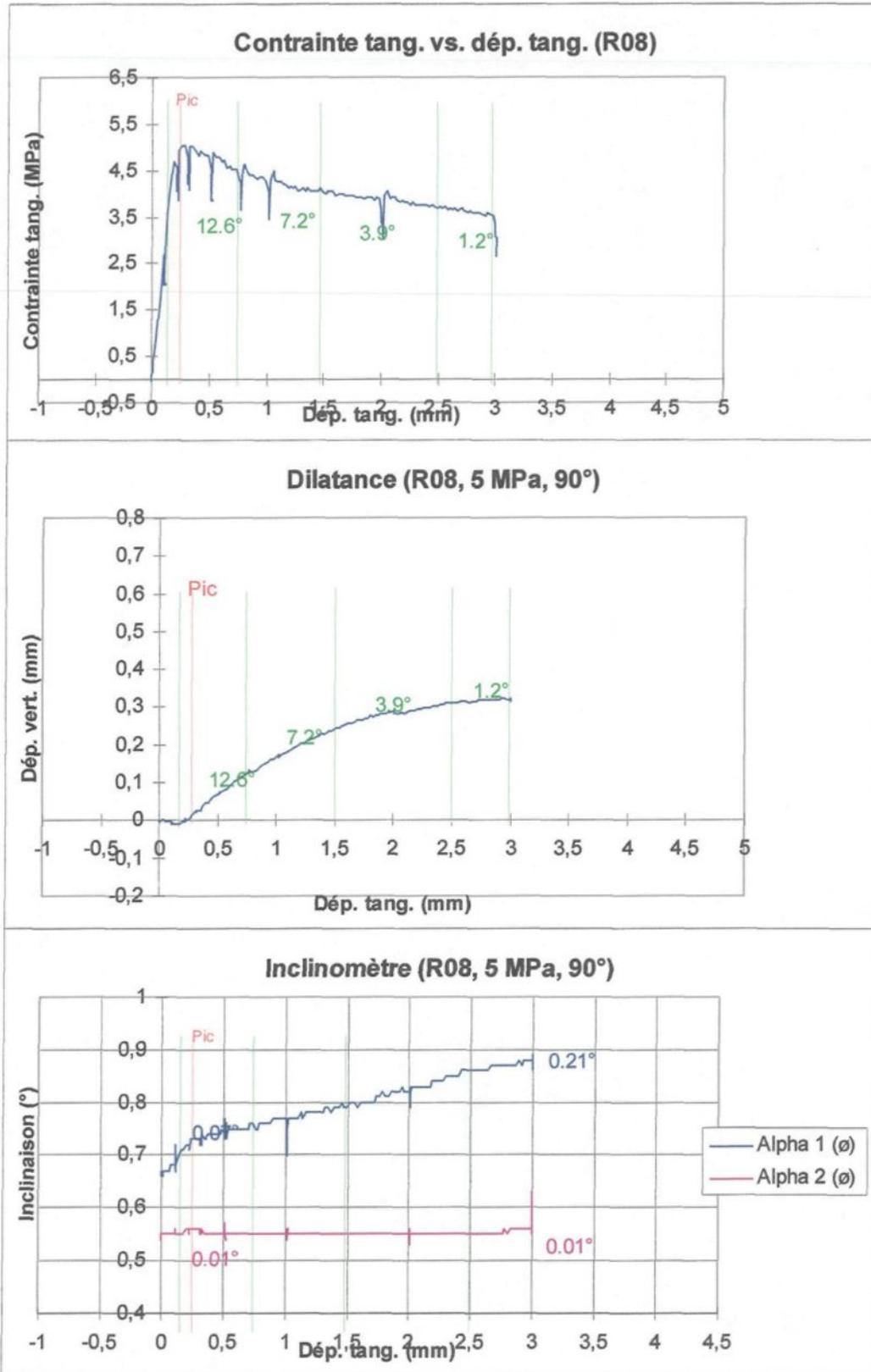
Dilatance (R15, 3 MPa, 270°)

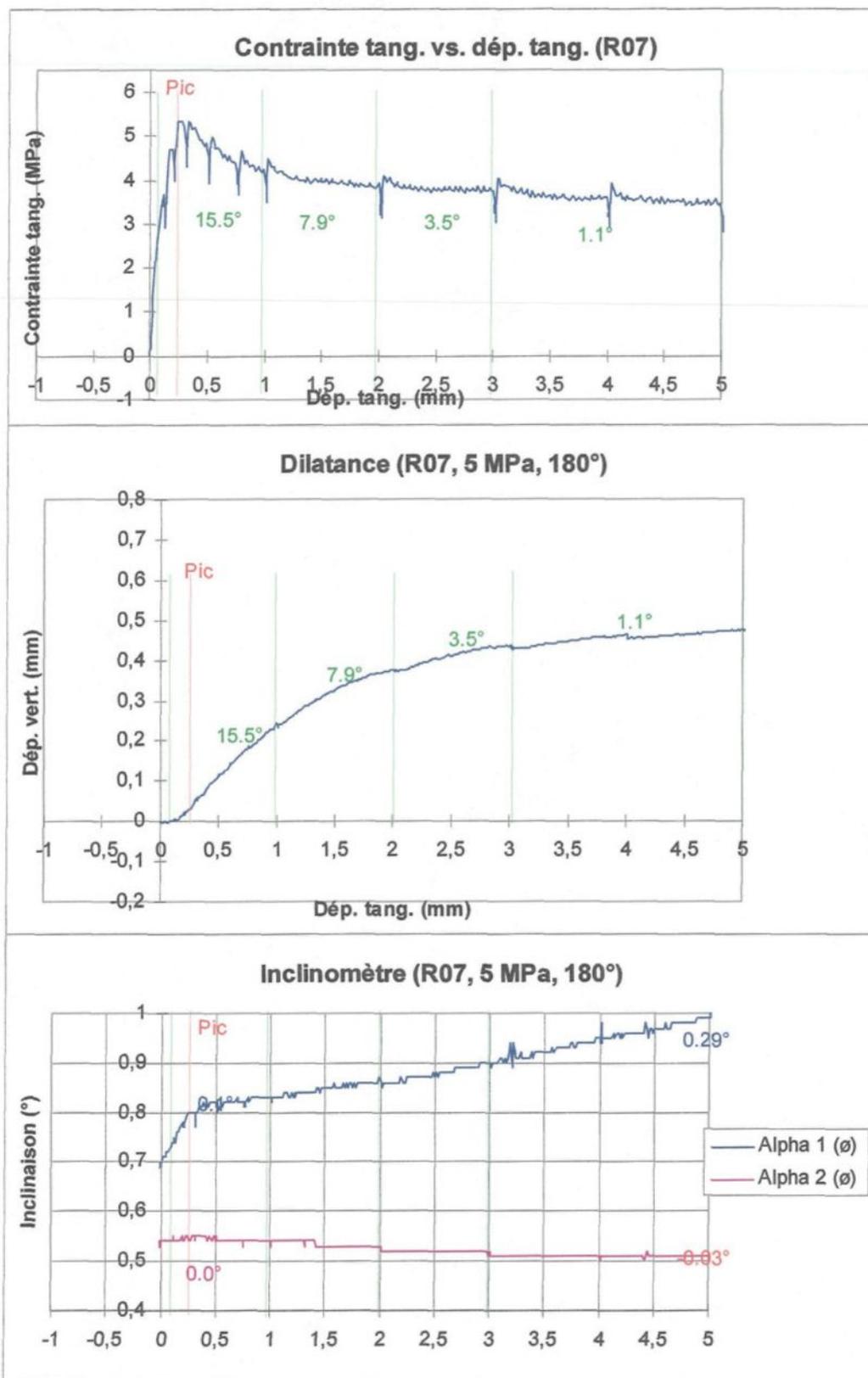


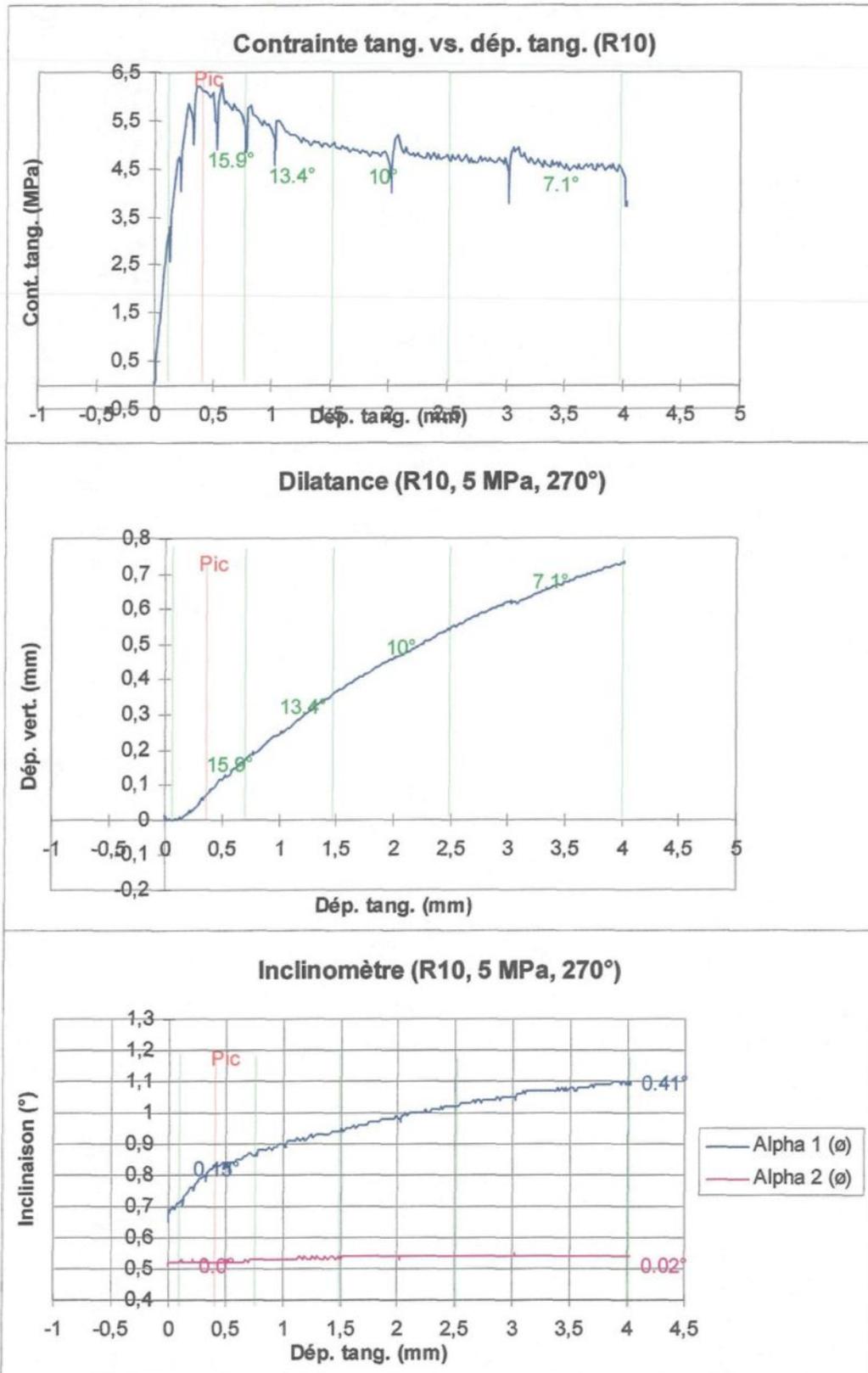
Inclinomètre (R15, 3 MPa, 270°)

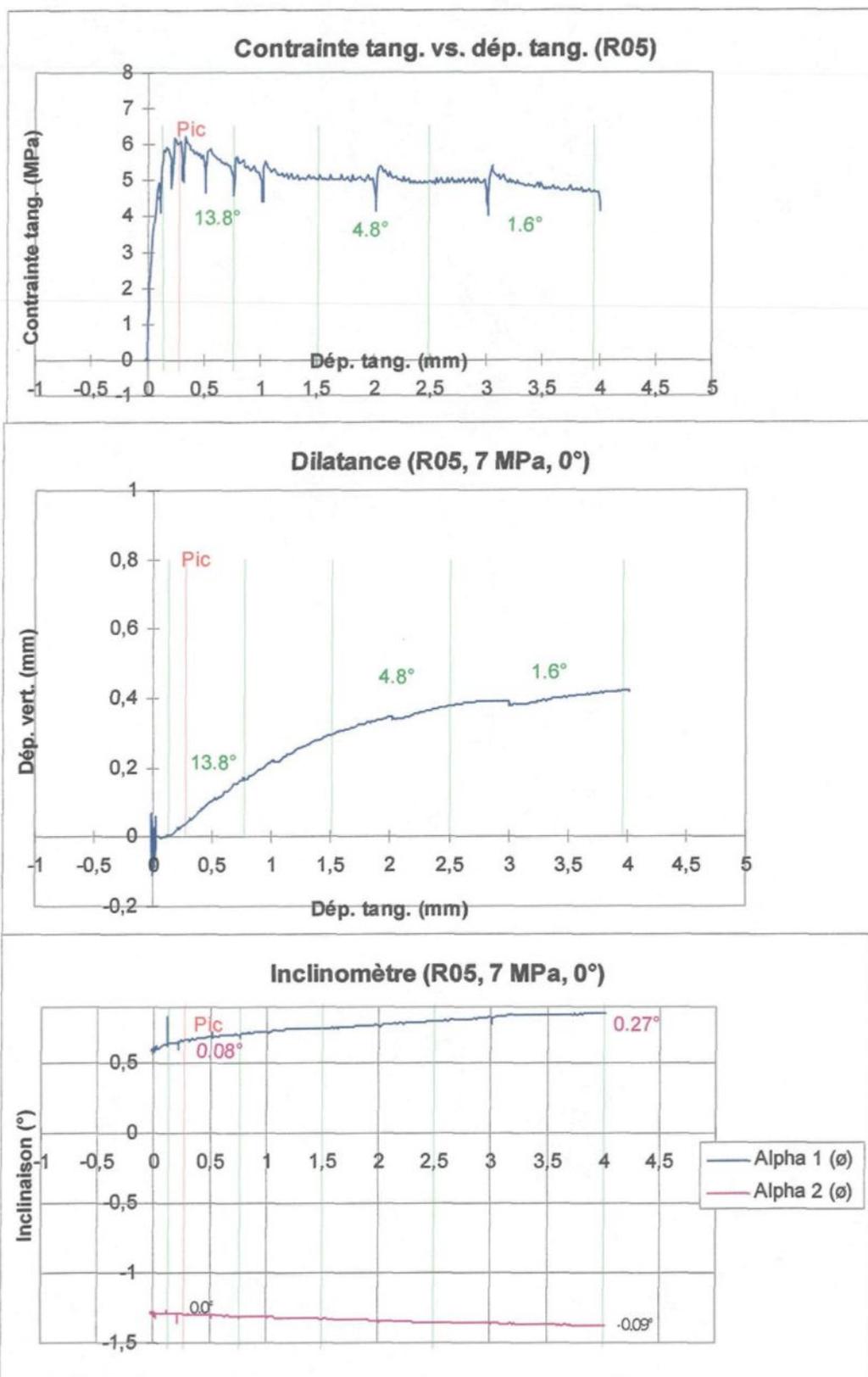


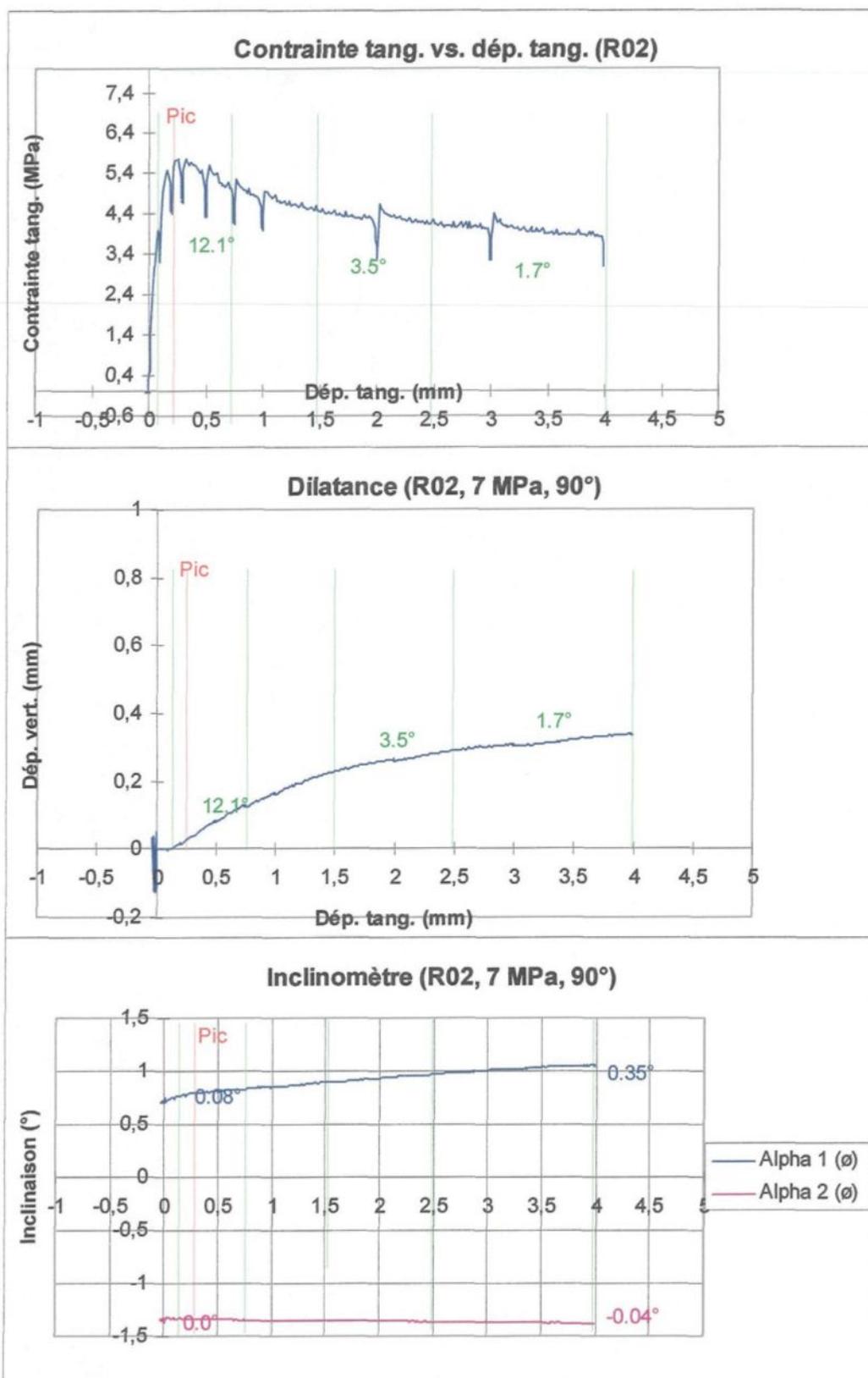




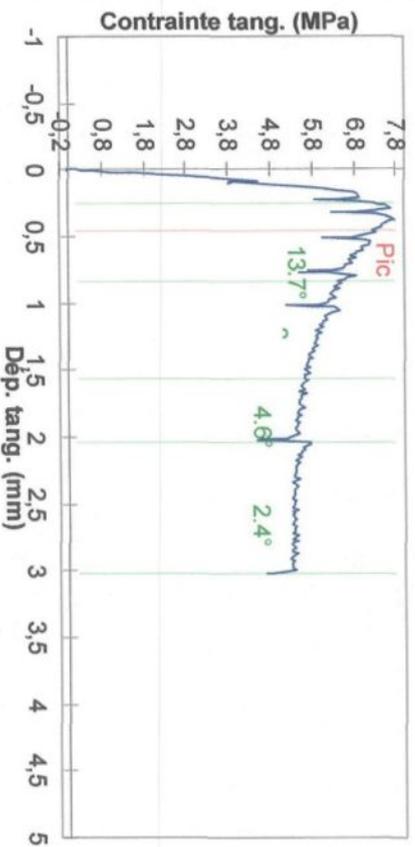




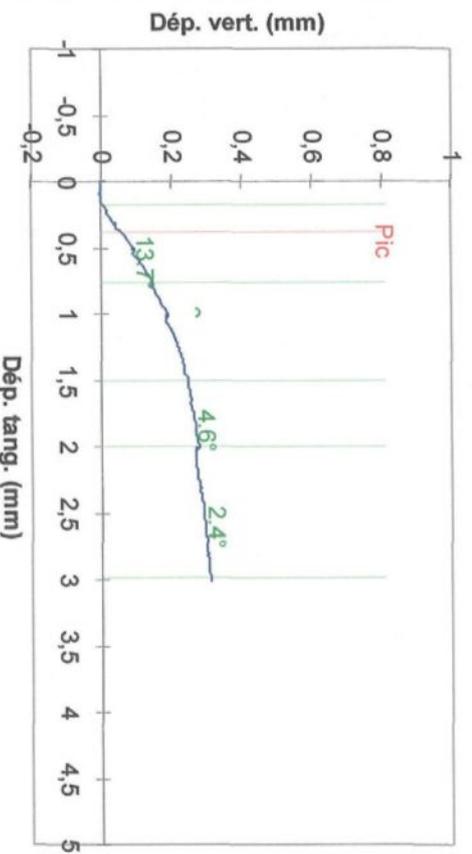




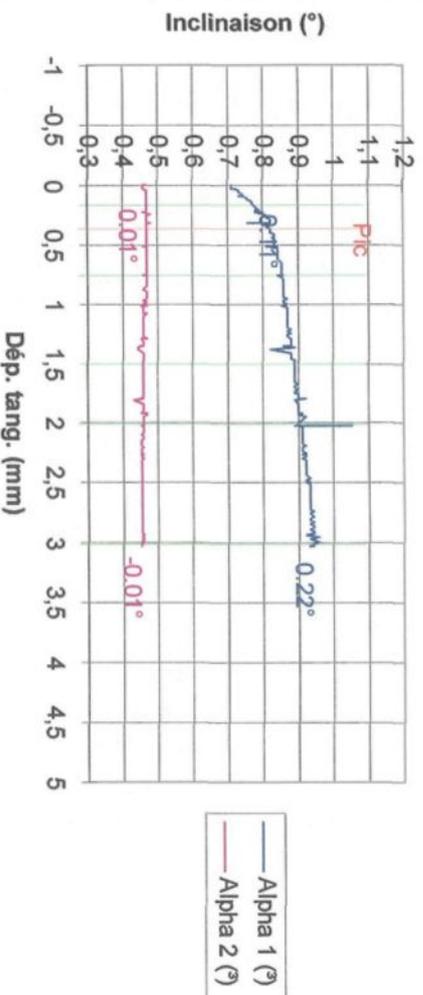
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R09)

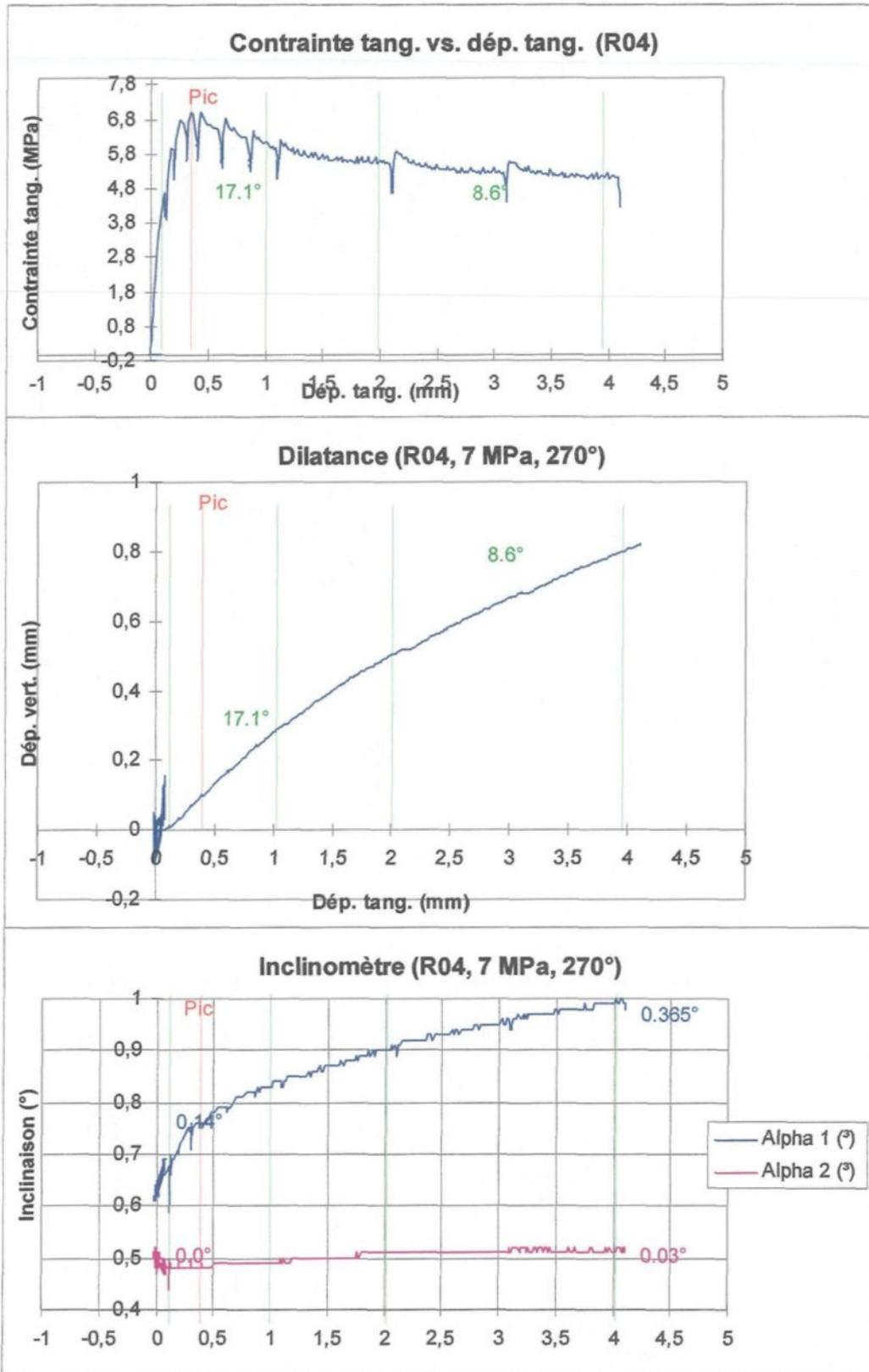


Dilatance (R09, 7 MPa, 180°)

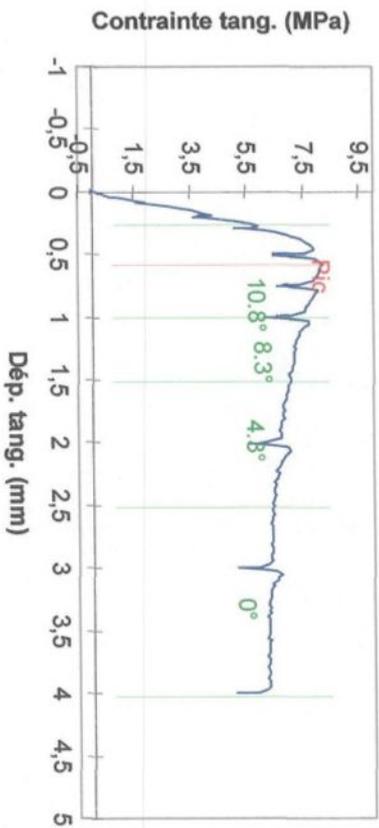


Inclinomètre (R09, 7 MPa, 180°)

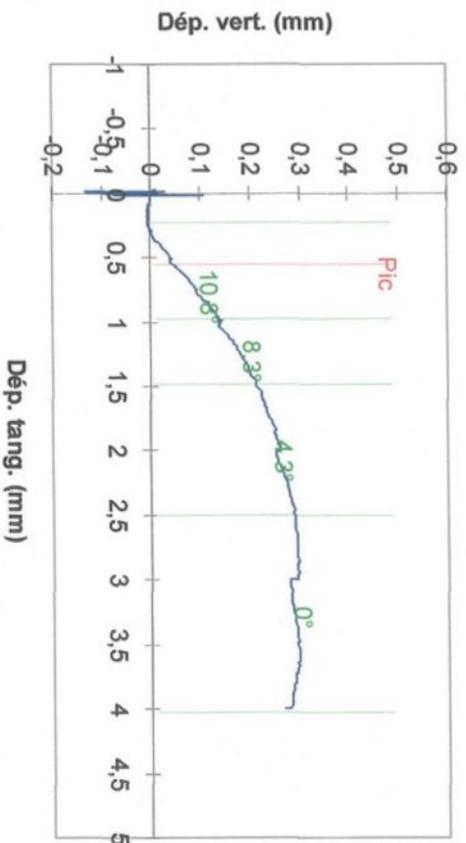




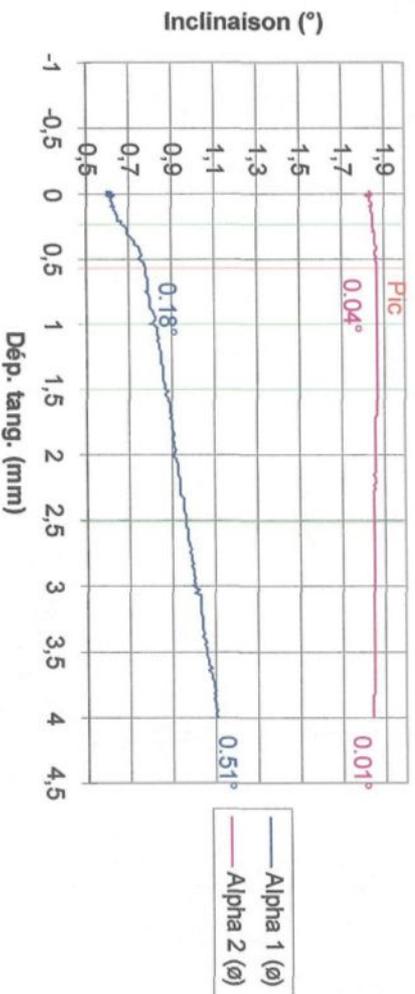
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R18)



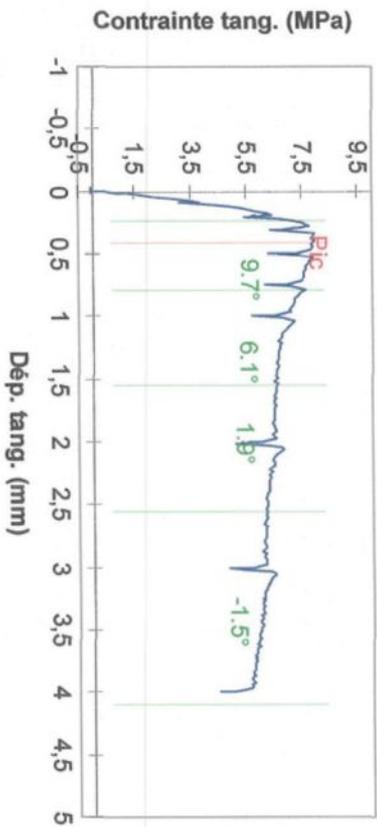
Dilatance (R18, 9 MPa, 0°)



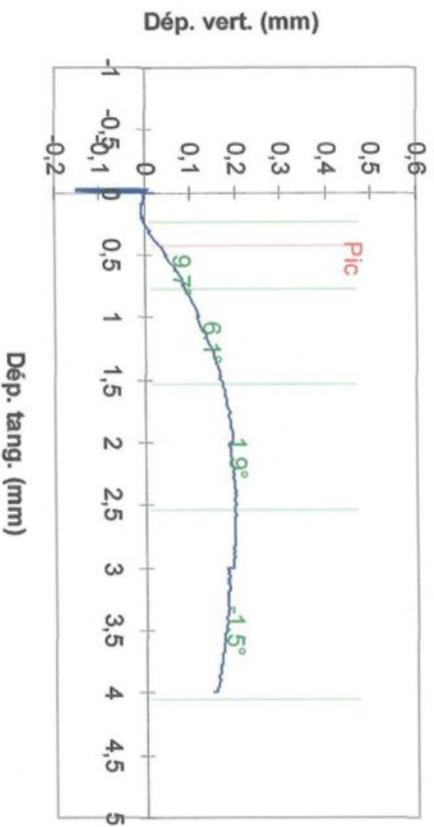
Inclinomètre (R18, 9 MPa, 0°)



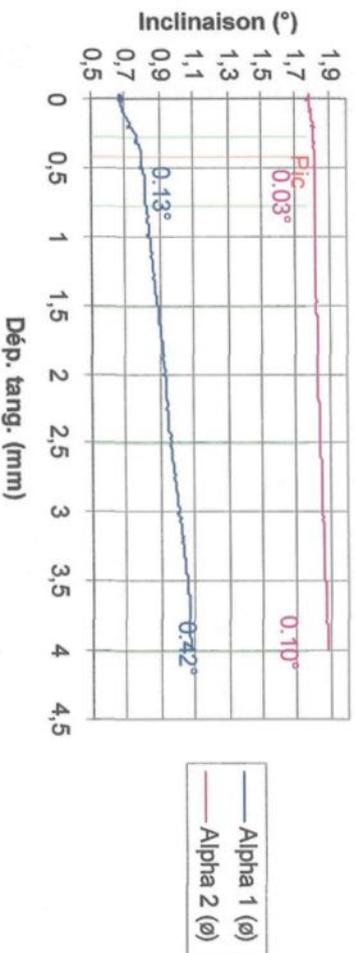
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R20)



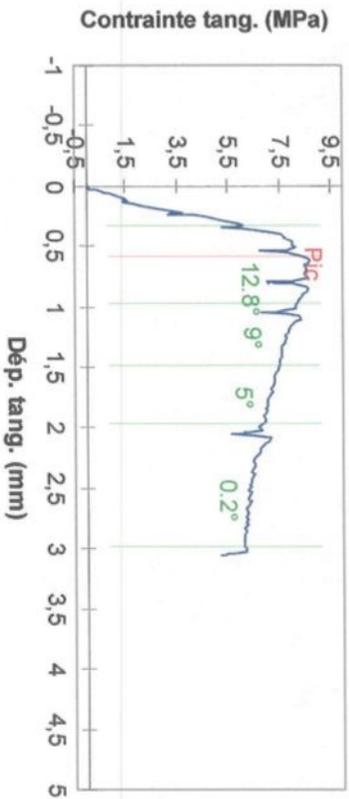
Dilatance (R20, 9 MPa, 90°)



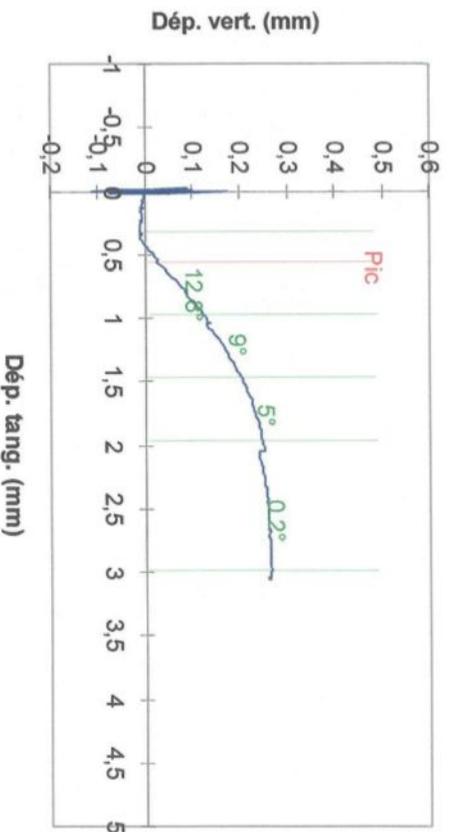
Inclinomètre (R20, 9 MPa, 90°)



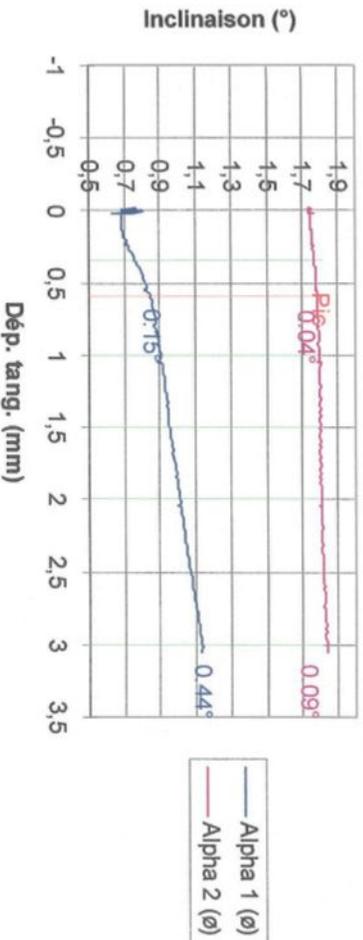
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R19)

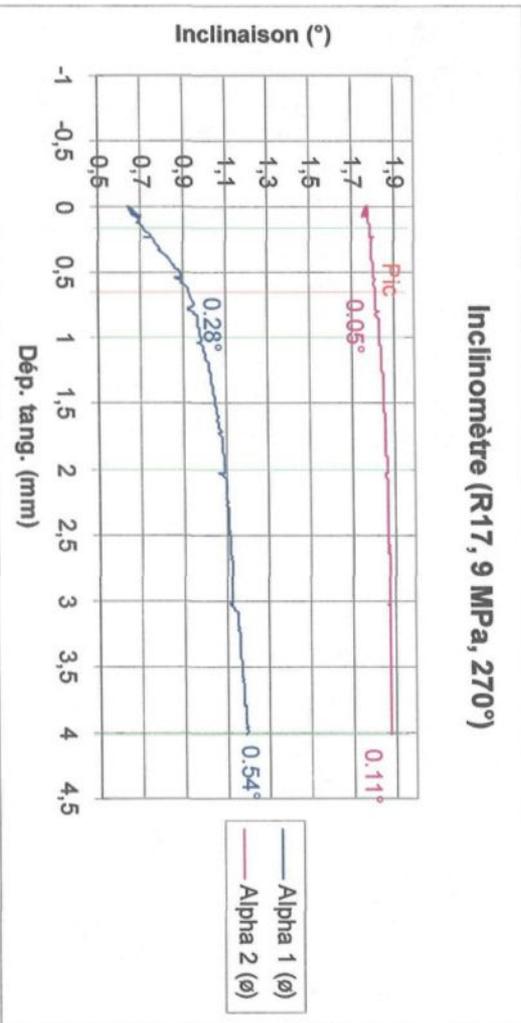
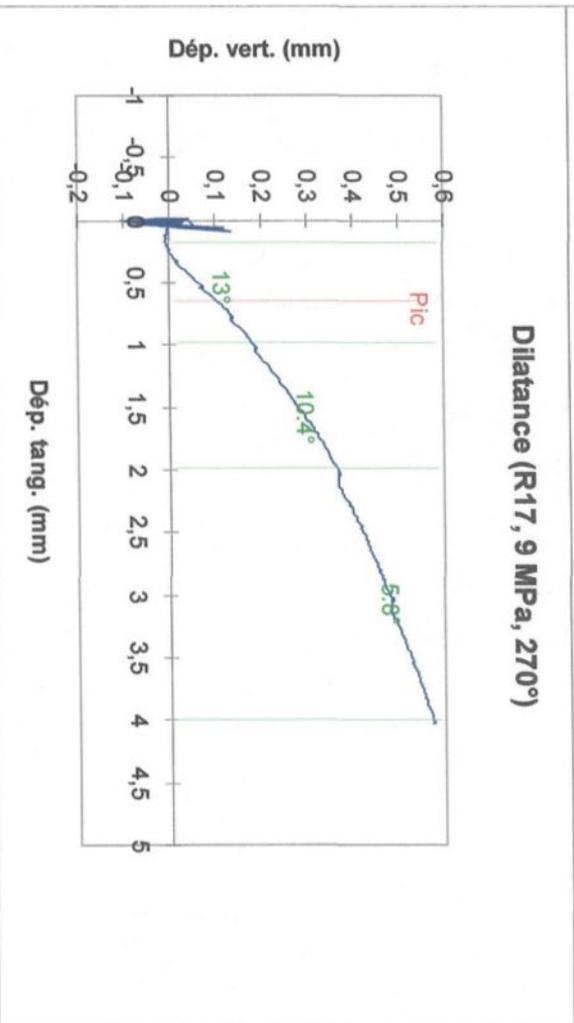
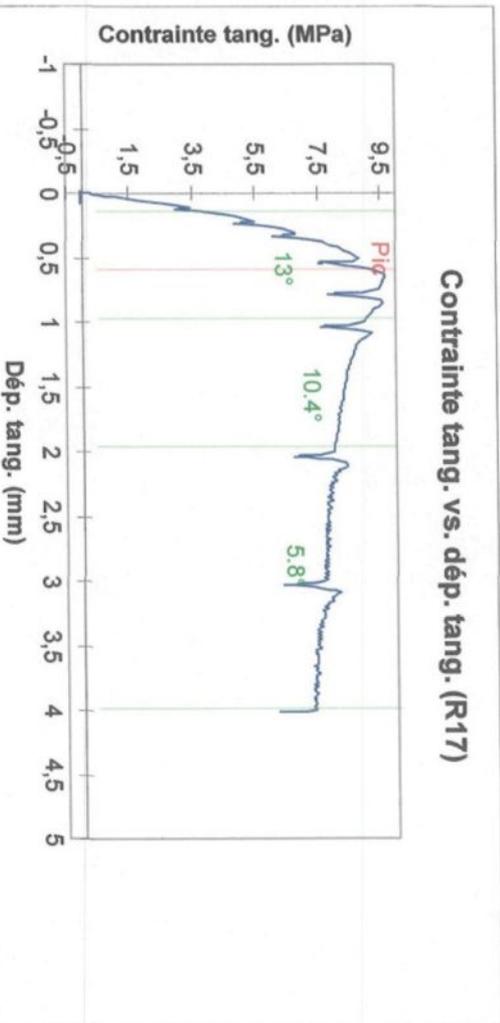


Dilatance (R19, 9 MPa, 180°)



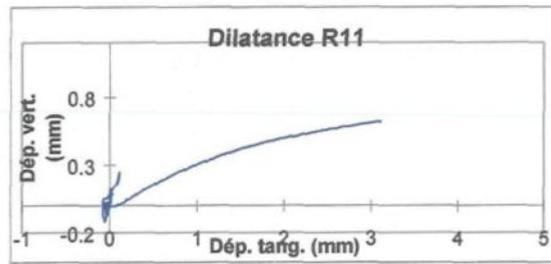
Inclinomètre (R19, 9 MPa, 180°)



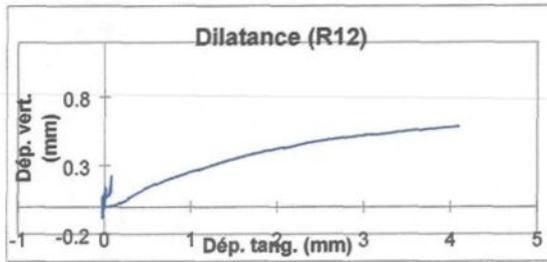


Contrainte normale
3 MPa

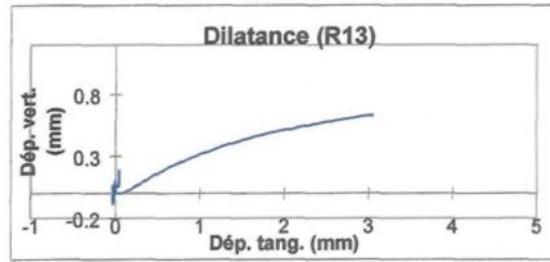
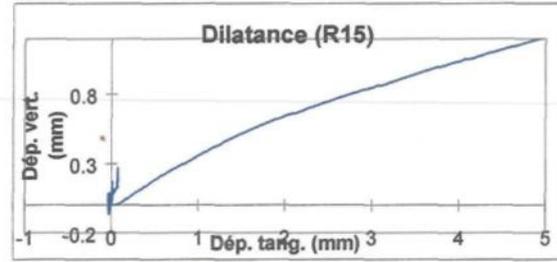
180°



90°



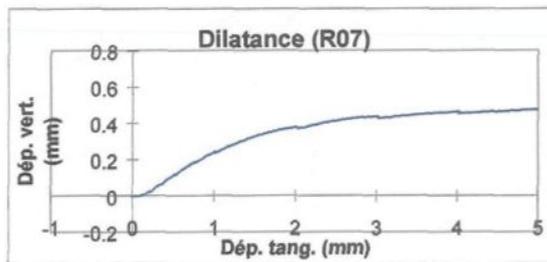
270°



0°

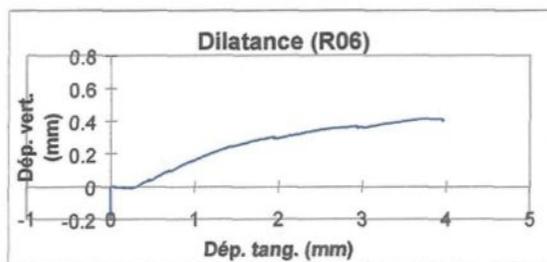
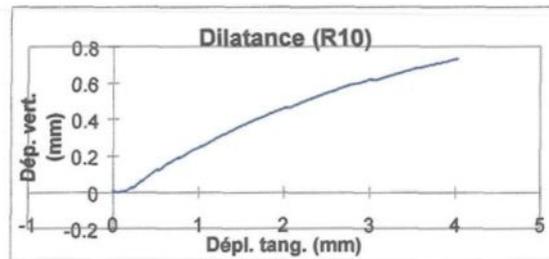
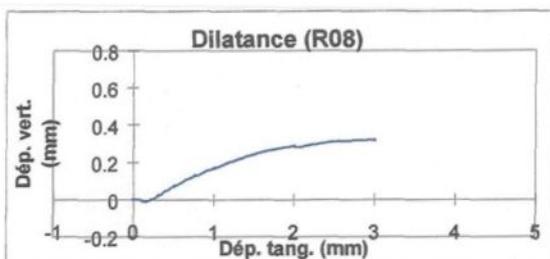
Contrainte normale
5 MPa

180°



90°

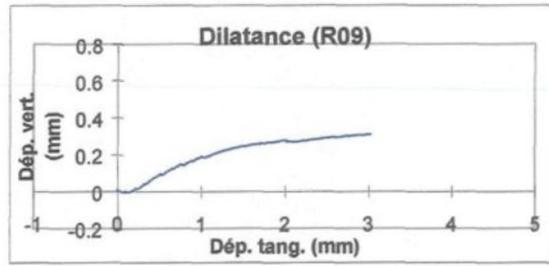
270°



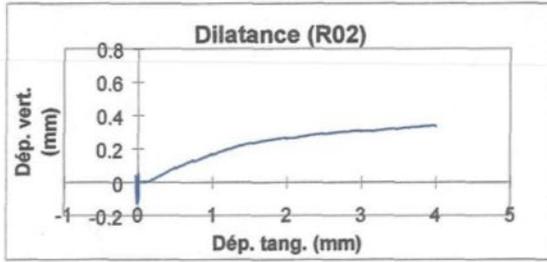
0°

Contrainte normale
7 MPa

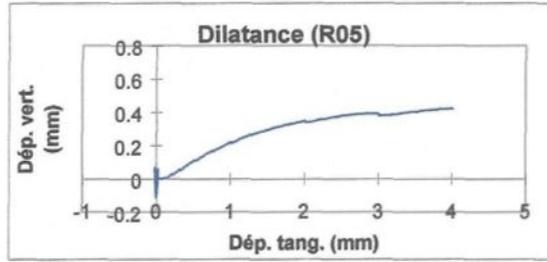
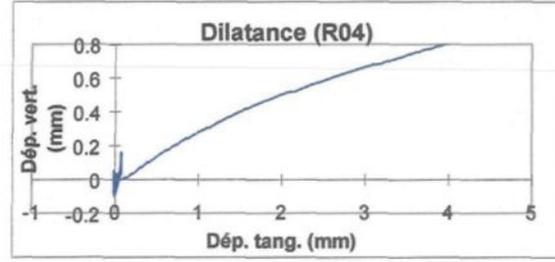
180°



90°



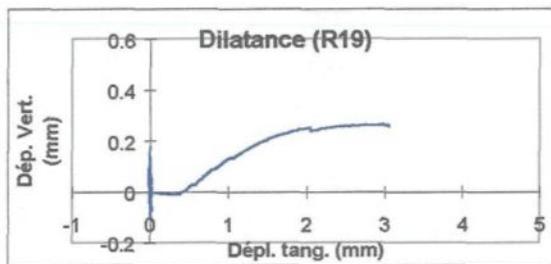
270°



0°

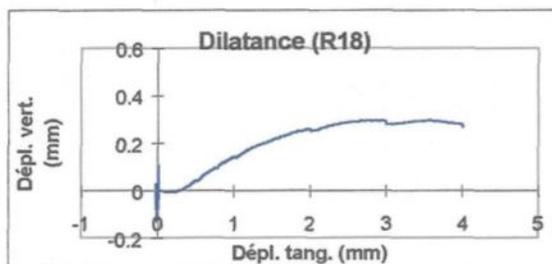
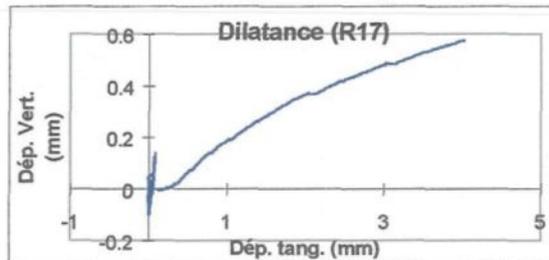
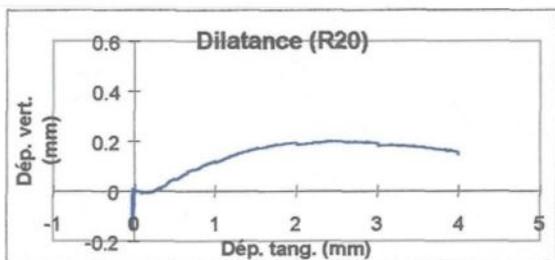
Contrainte normale
9 MPa

0°



90°

270°



0°

ANNEXE 10

RÉSULTATS DES ESSAIS HYDROMÉCANIQUES SUR LA FRACTURE

ANNEXE 10**RÉSULTATS DES ESSAIS HYDROMÉCANIQUES SUR LA FRACTURE**

Liens entre le numéro d'essai, la direction de cisaillement et le palier de contrainte normale.

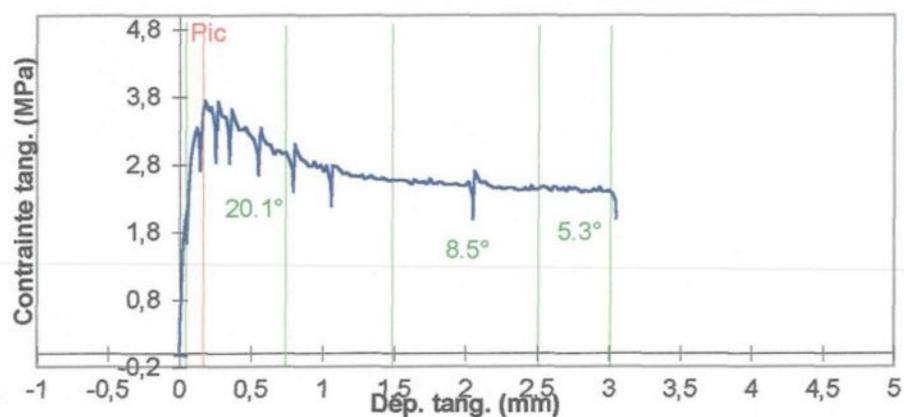
Essai 13, 3 MPa, direction 0°
Essai 12, 3 MPa, direction 90°
Essai 11, 3 MPa, direction 180°
Essai 15, 3 MPa, direction 270°

Essai 6, 5 MPa, direction 0°
Essai 8, 5 MPa, direction 90°
Essai 7, 5 MPa, direction 180°
Essai 10, 5 MPa, direction 270°

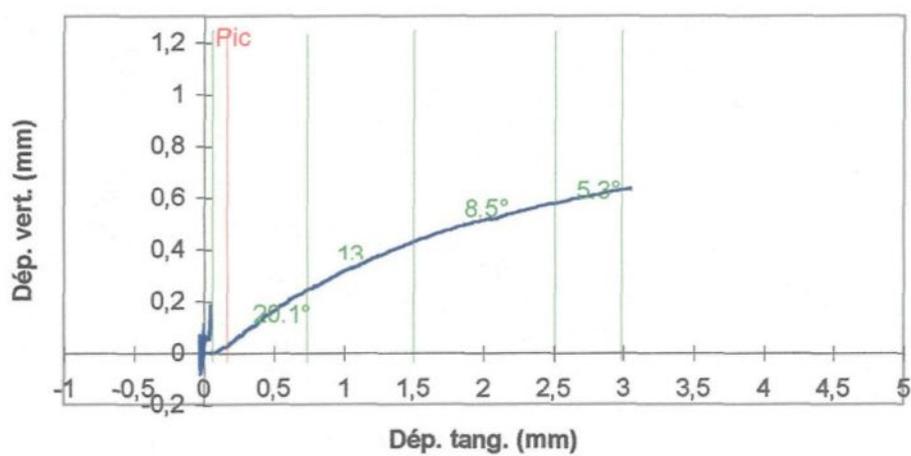
Essai 5, 7 MPa, direction 0°
Essai 2, 7 MPa, direction 90°
Essai 9, 7 MPa, direction 180°
Essai 4, 7 MPa, direction 270°

Essai 18, 9 MPa, direction 0°
Essai 20, 9 MPa, direction 90°
Essai 17, 9 MPa, direction 180°
Essai 19, 9 MPa, direction 270°

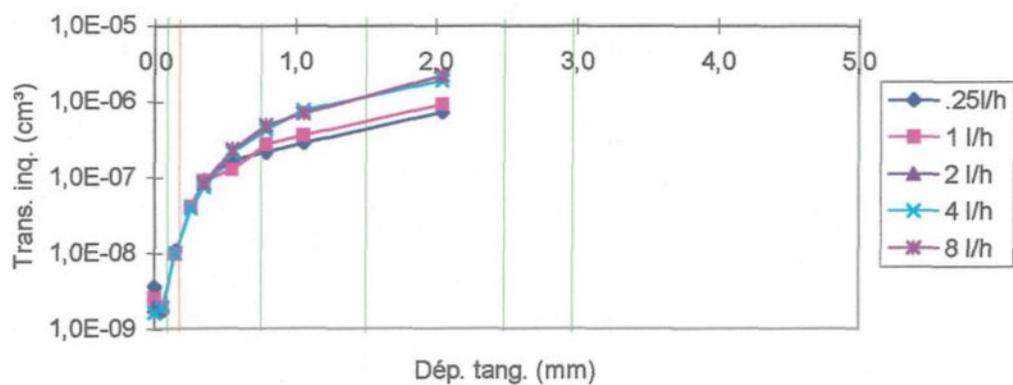
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R13)

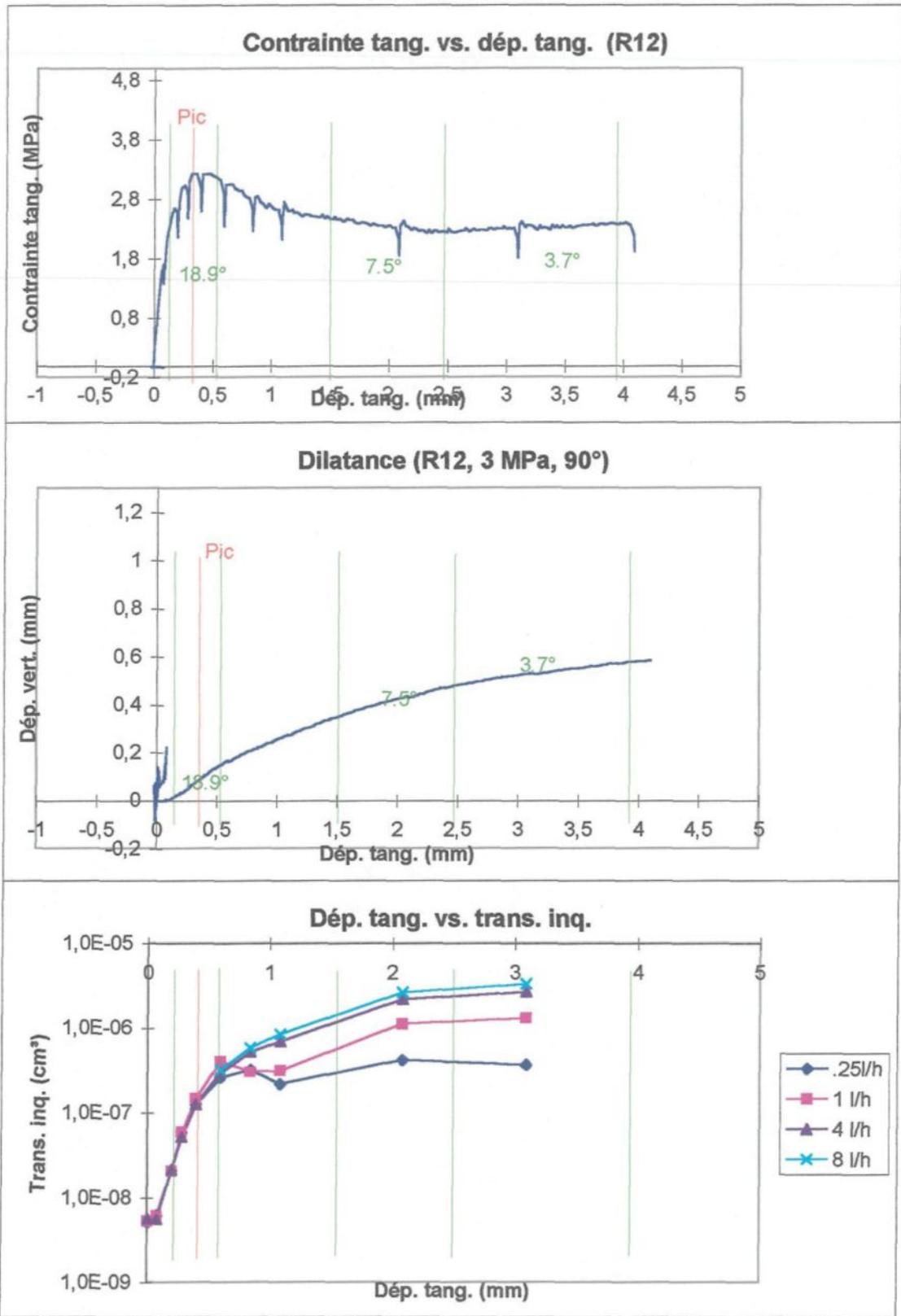


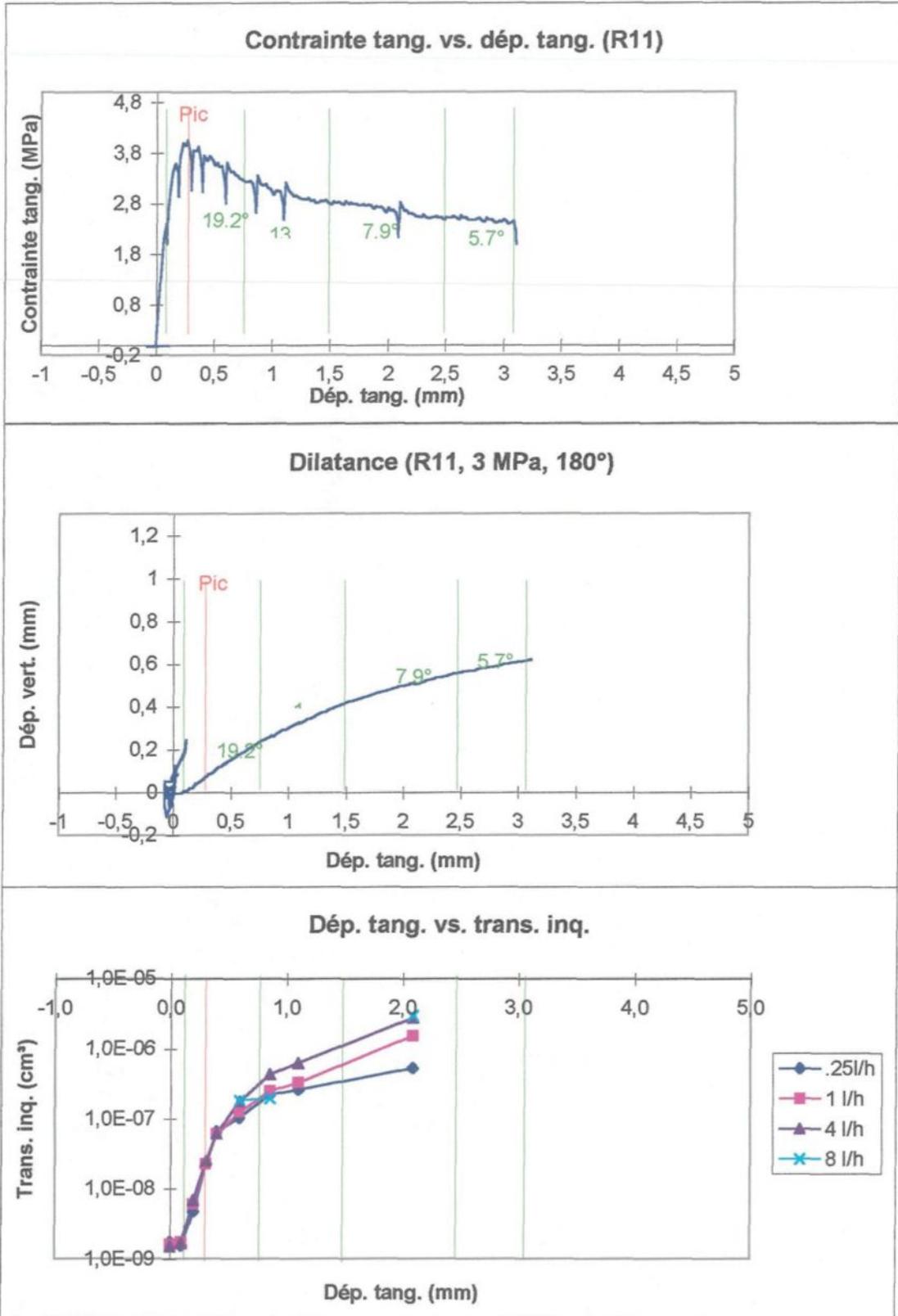
Dilatance (R13, 3 MPa, 0°)



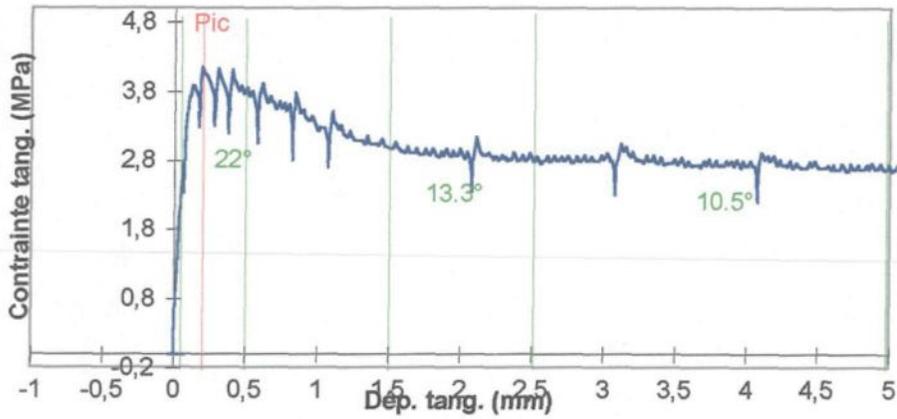
Dép. tang. vs. trans. inq.



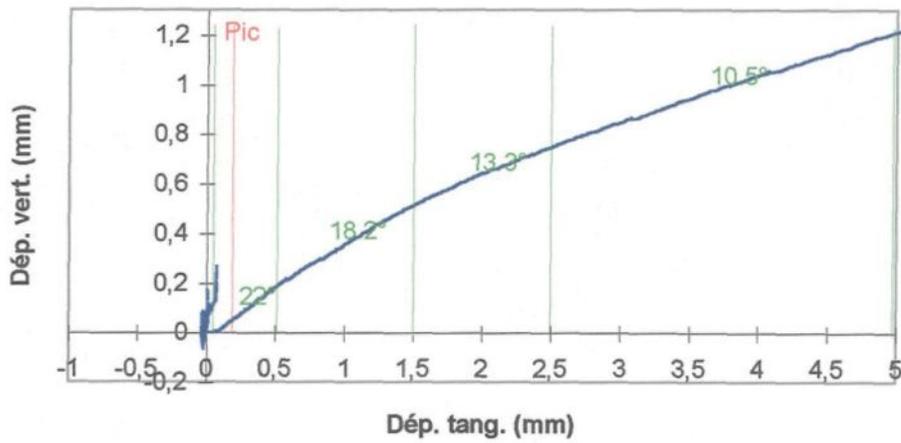




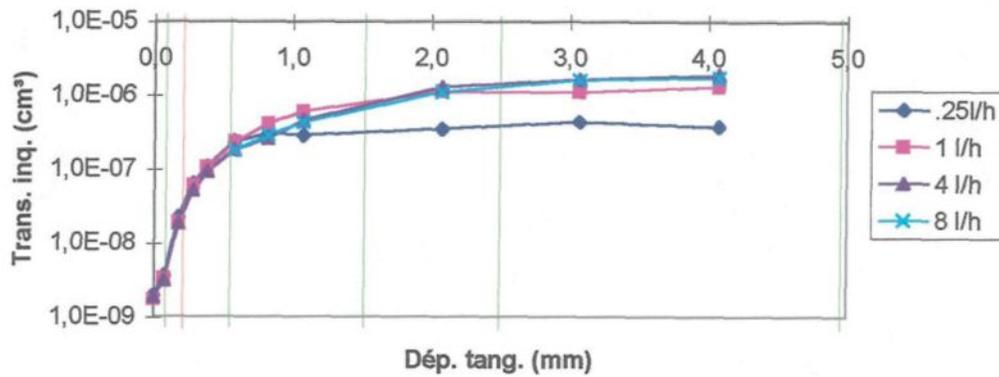
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R15)

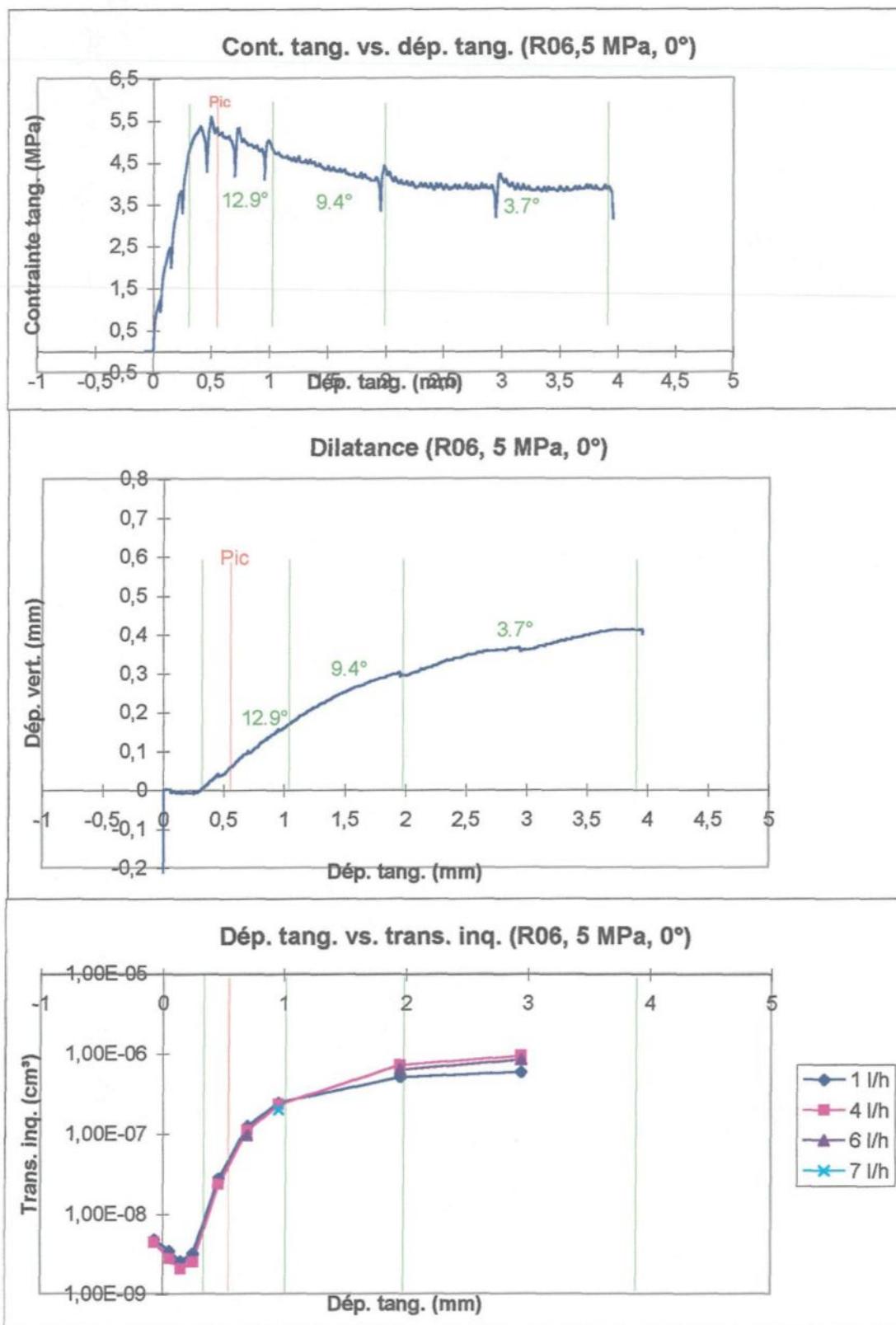


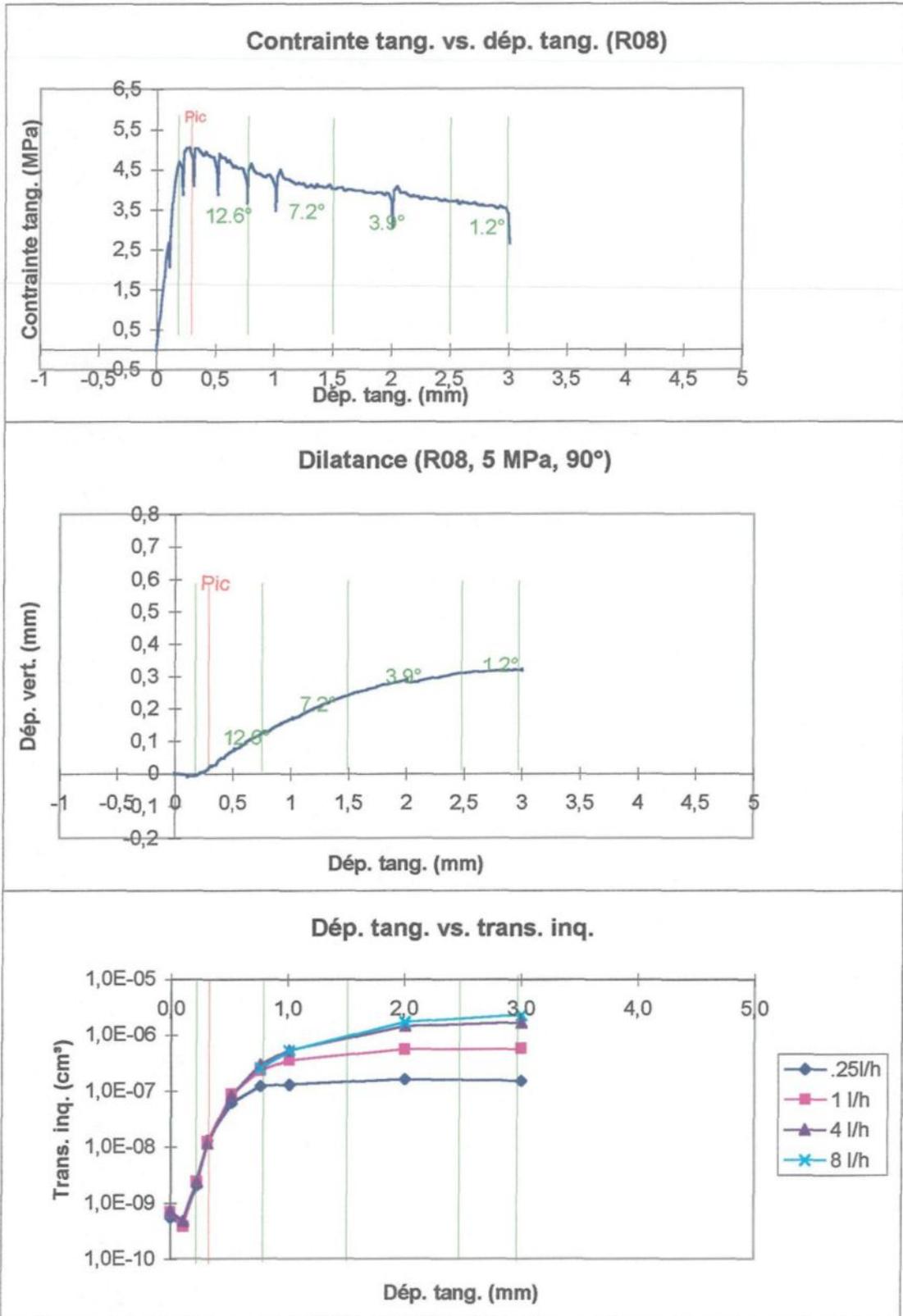
Dilatance (R15, 3 MPa, 270°)

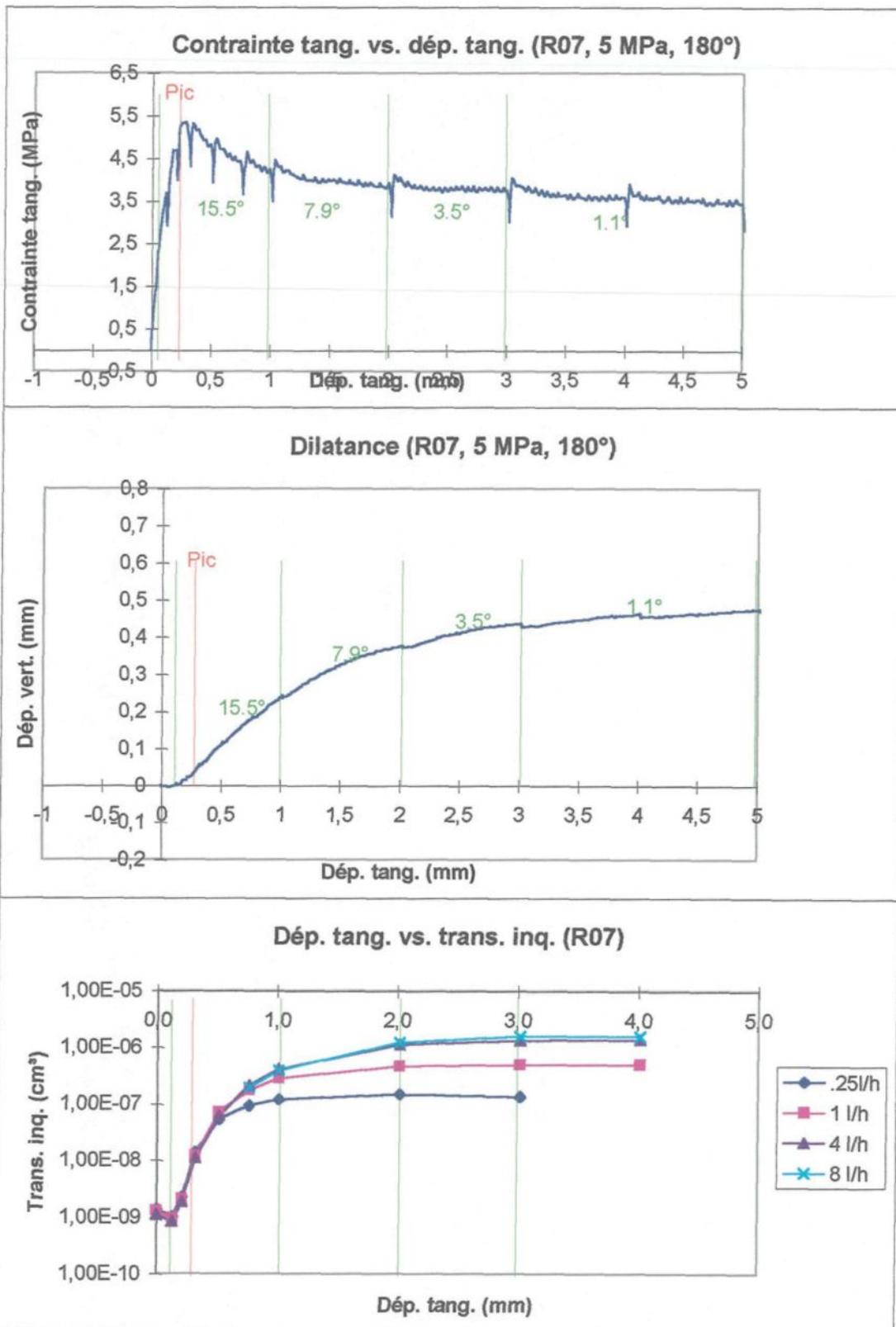


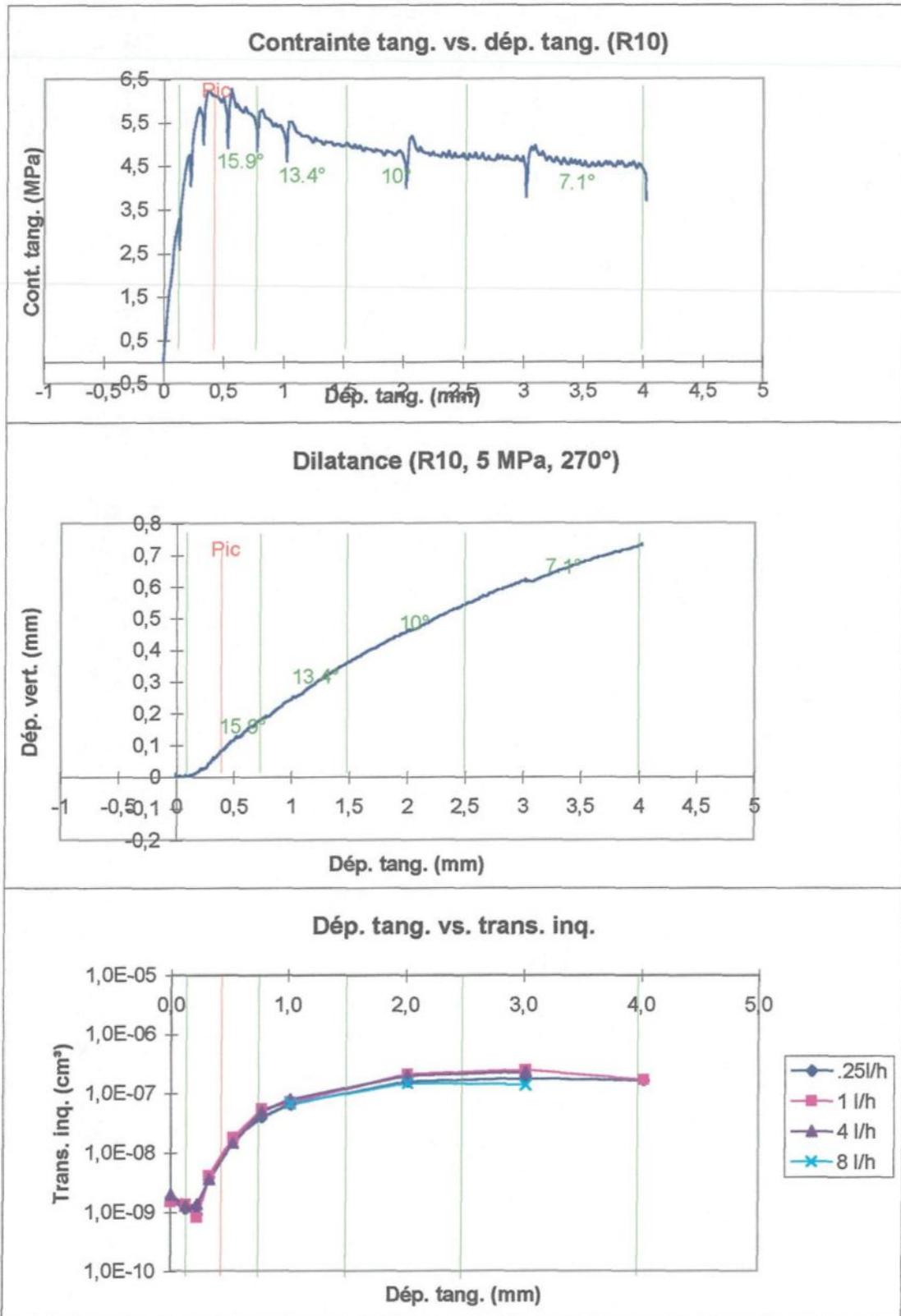
Dép. tang. vs. trans. inq.

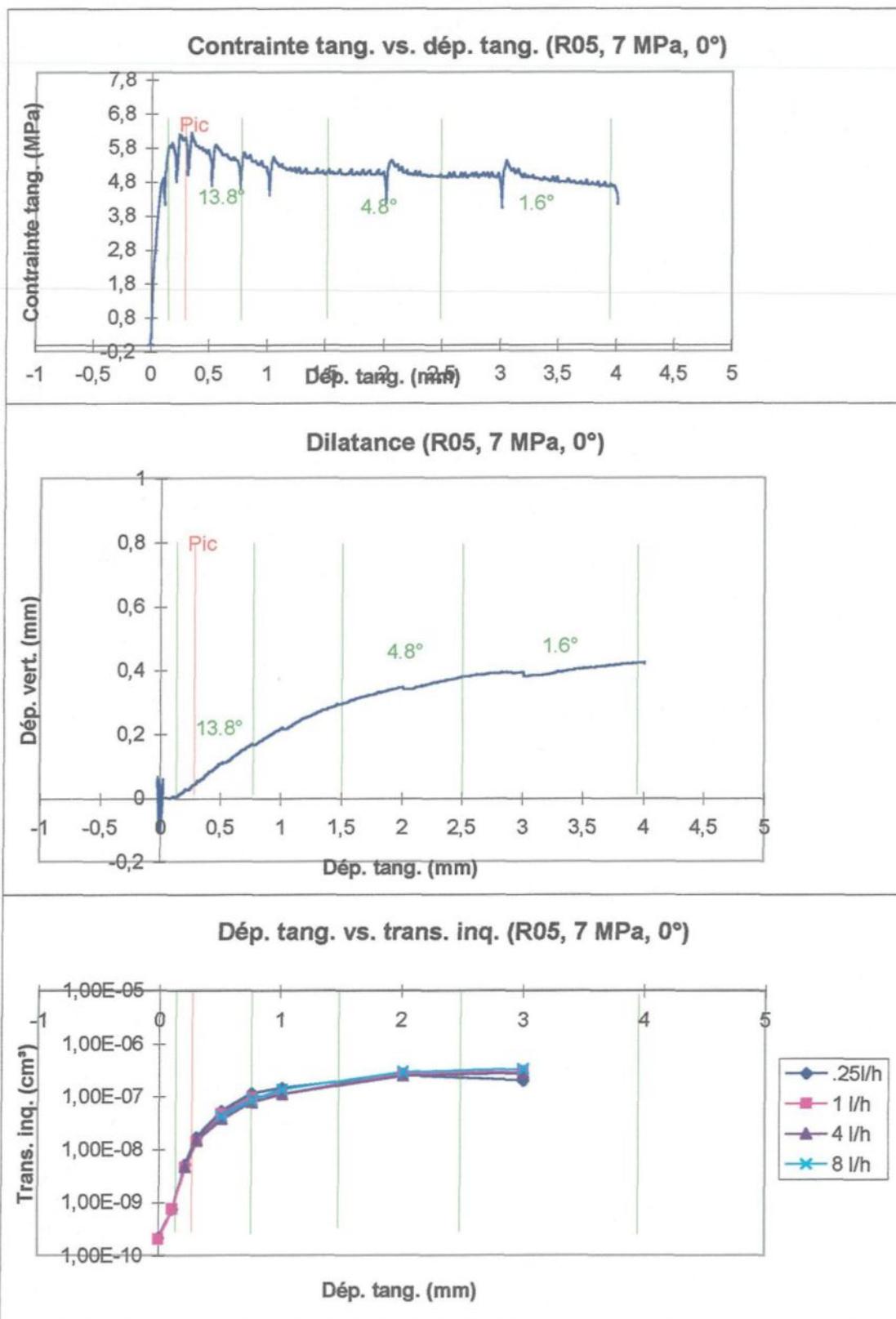


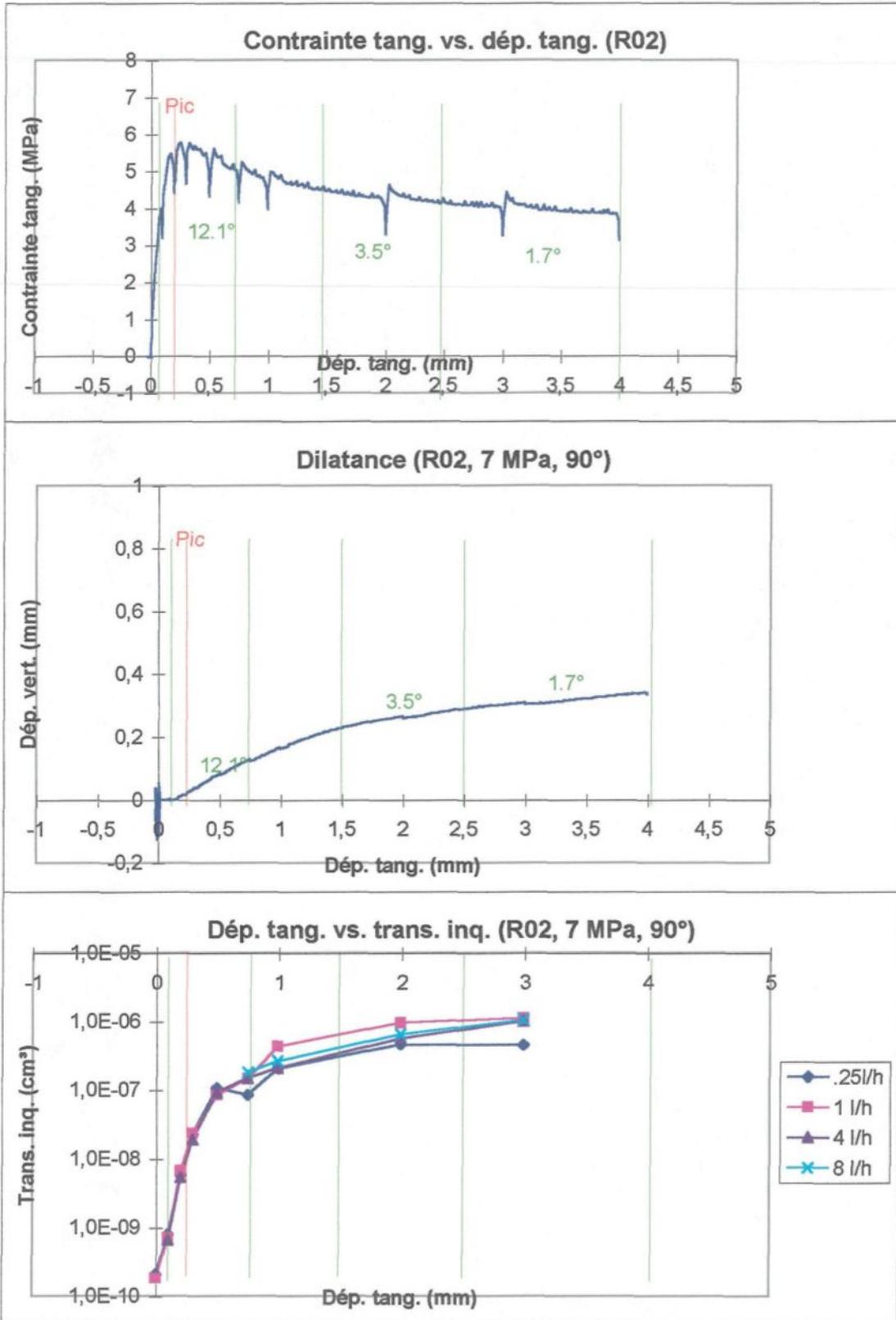




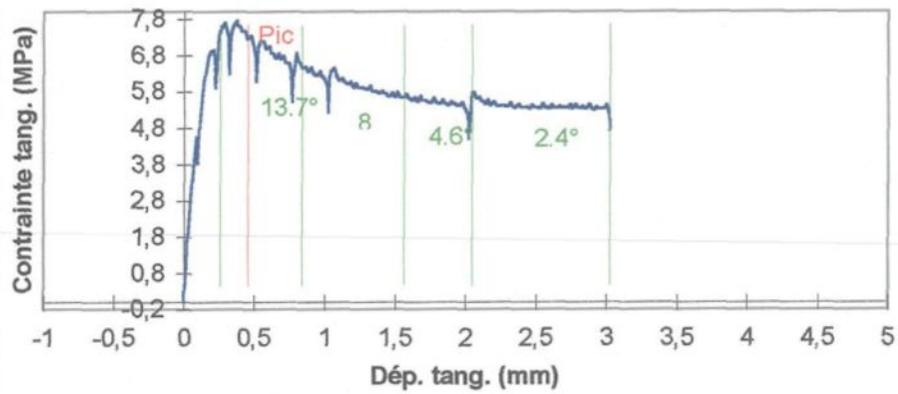




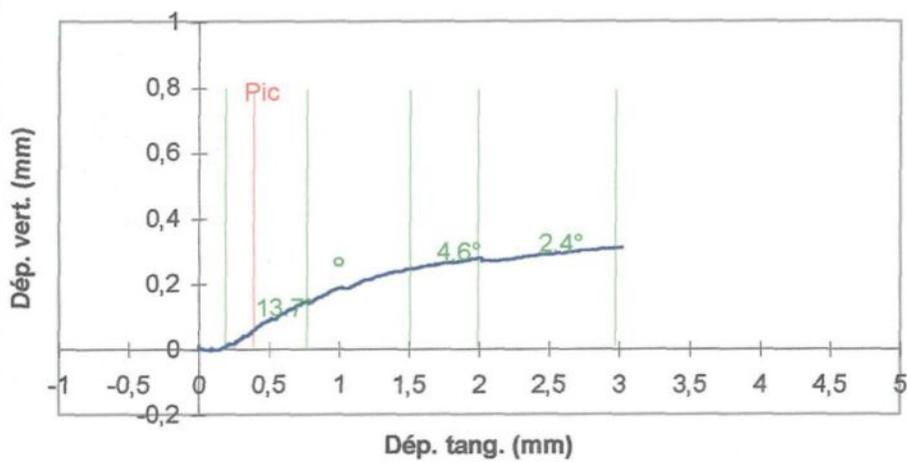




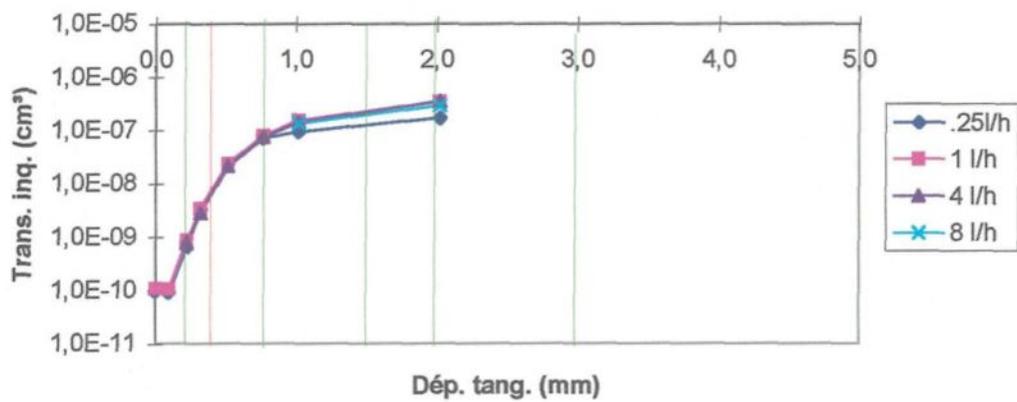
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R09)



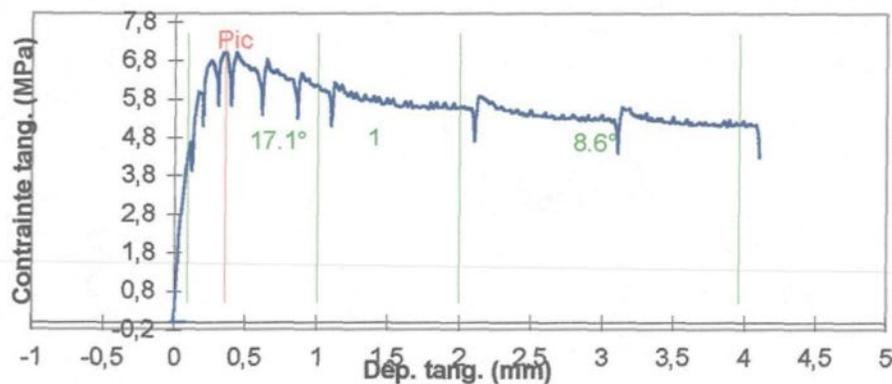
Dilatance (R09, 7 MPa, 180°)



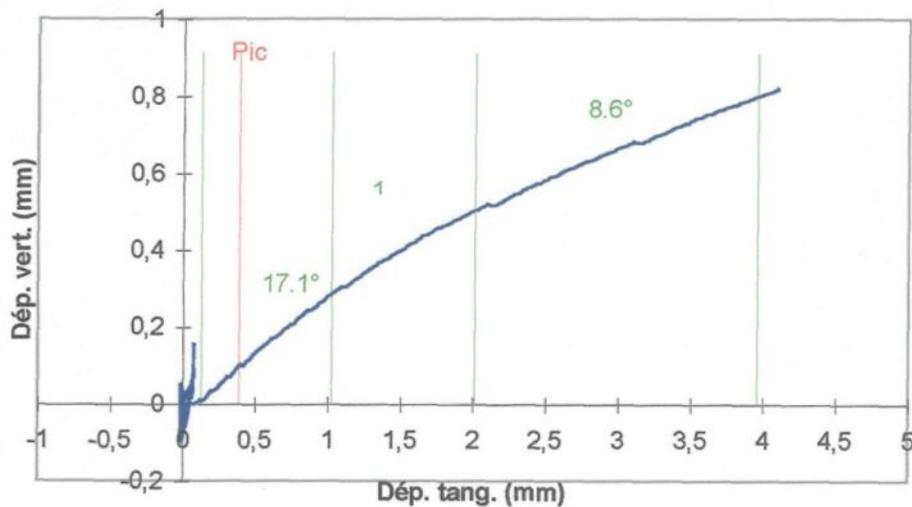
Dép. tang. vs. trans. inq.



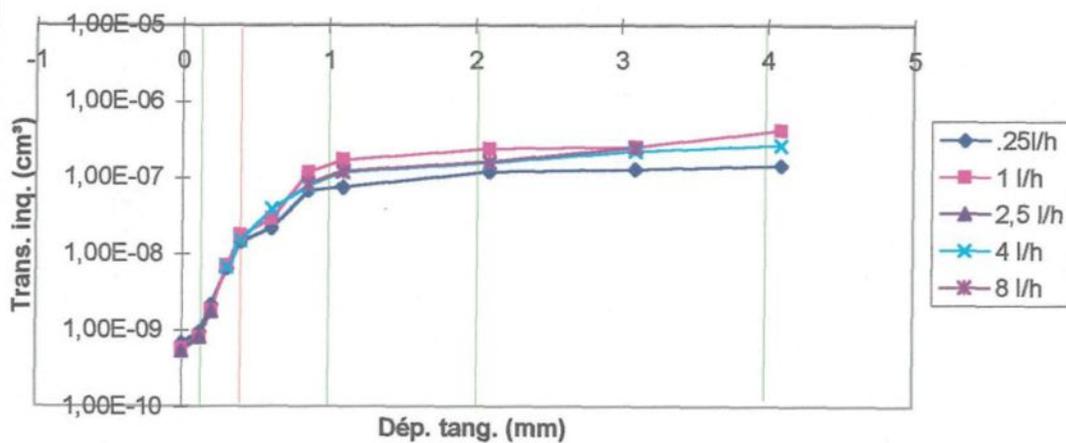
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R04, 7 MPa, 270°)

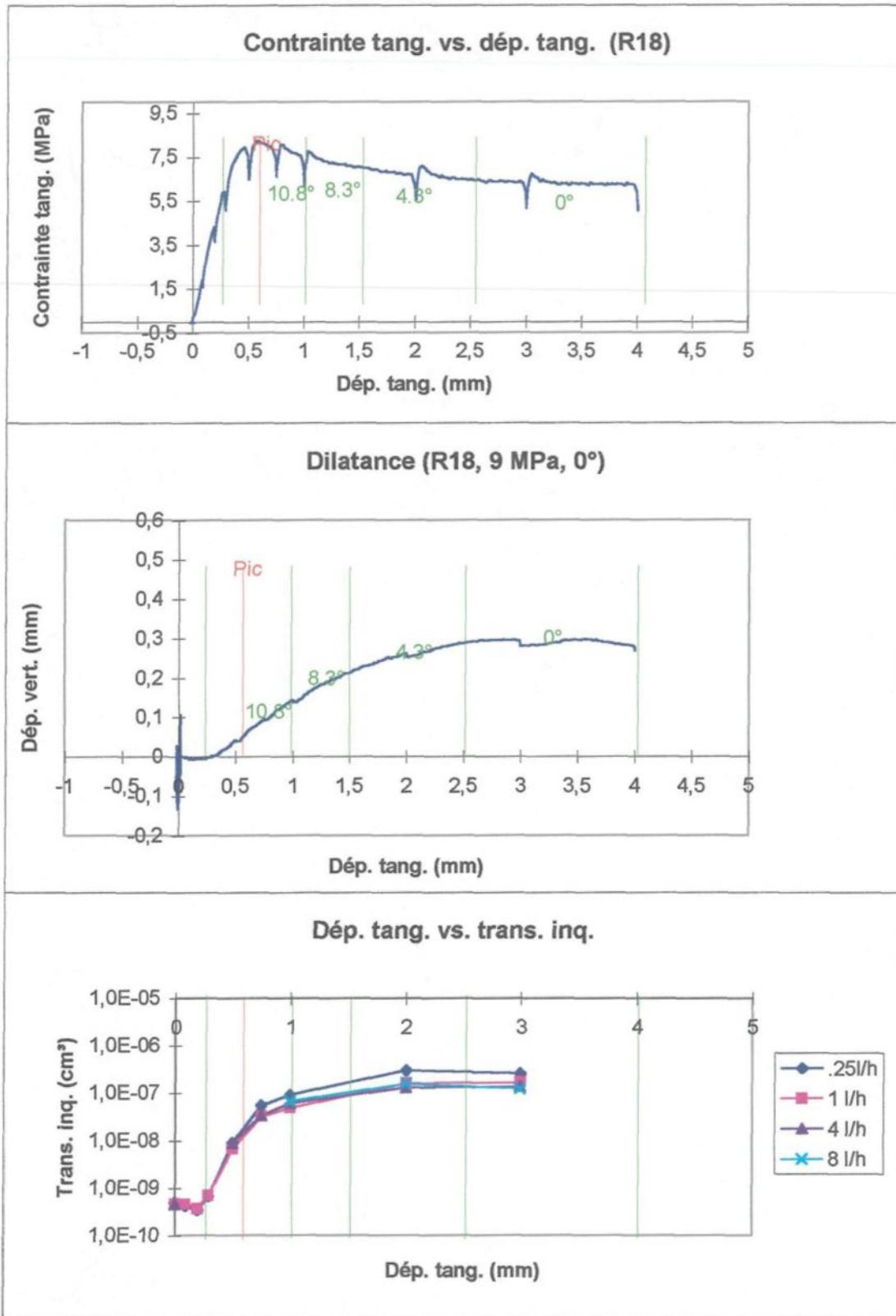


Dilatance (R04, 7 MPa, 270°)

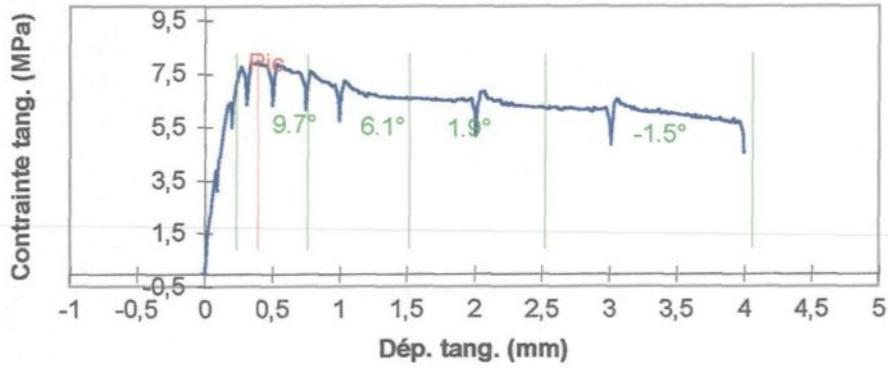


Dép. tang. vs. trans. inq. (R04, 7 MPa, 270°)

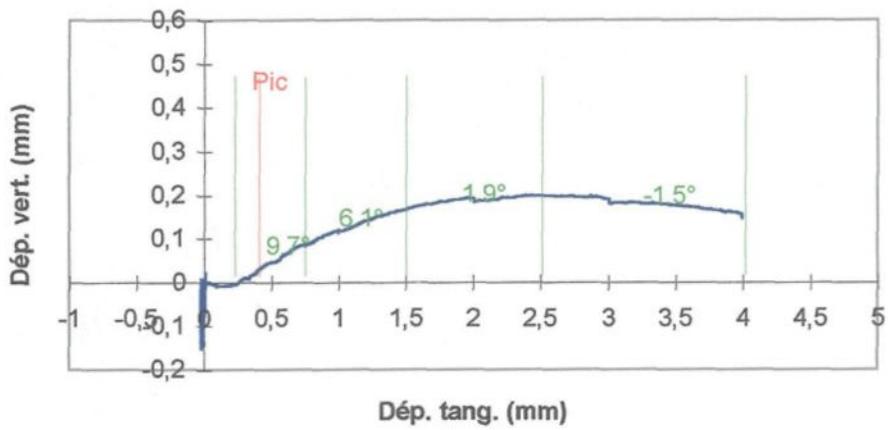




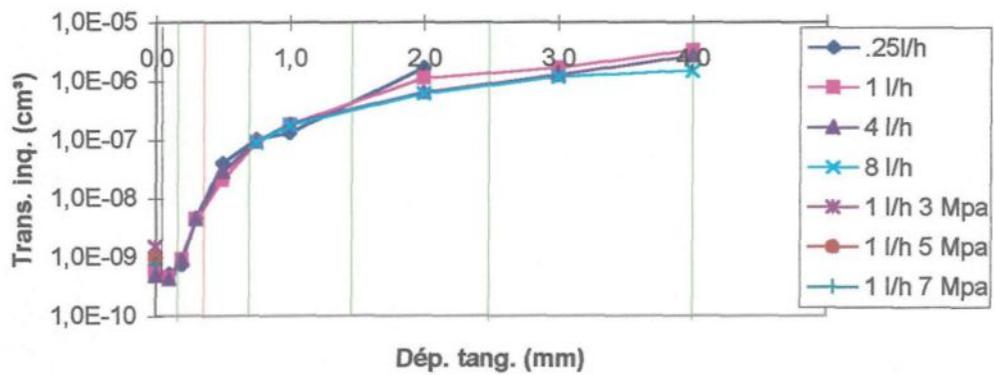
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R20)

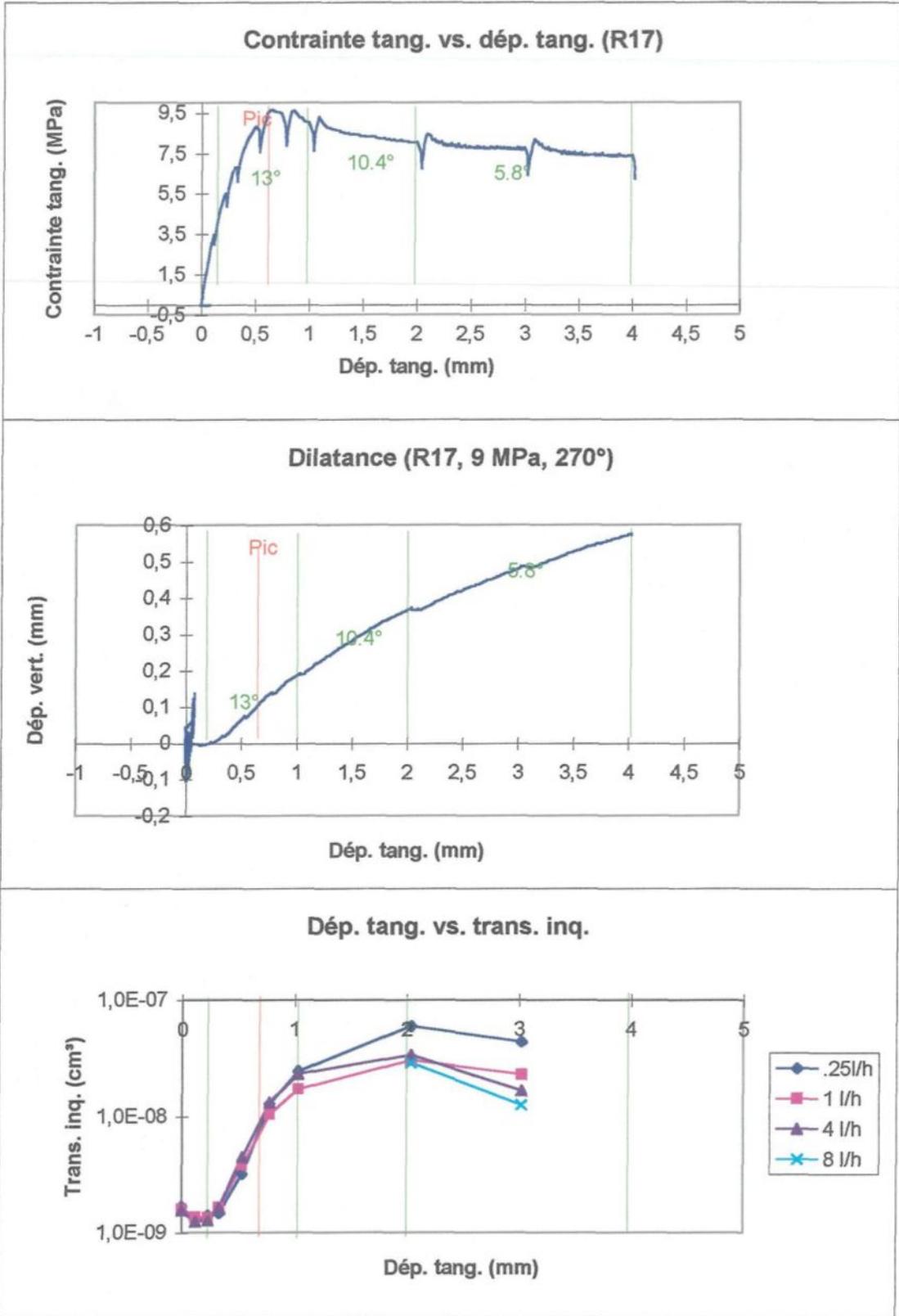


Dilatance (R20, 9 MPa, 90°)

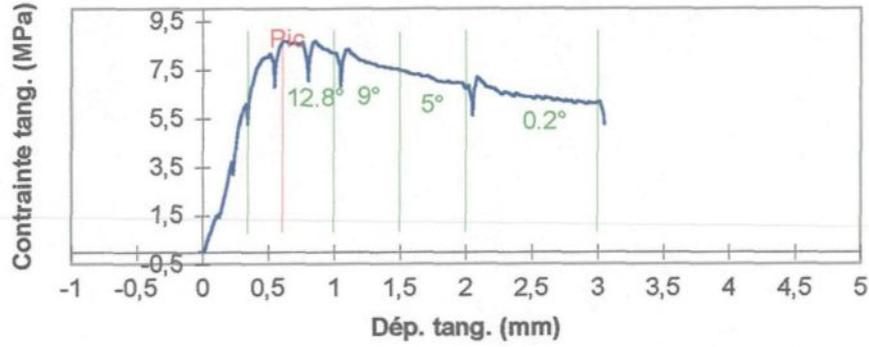


Dép. tang. vs. trans. inq.

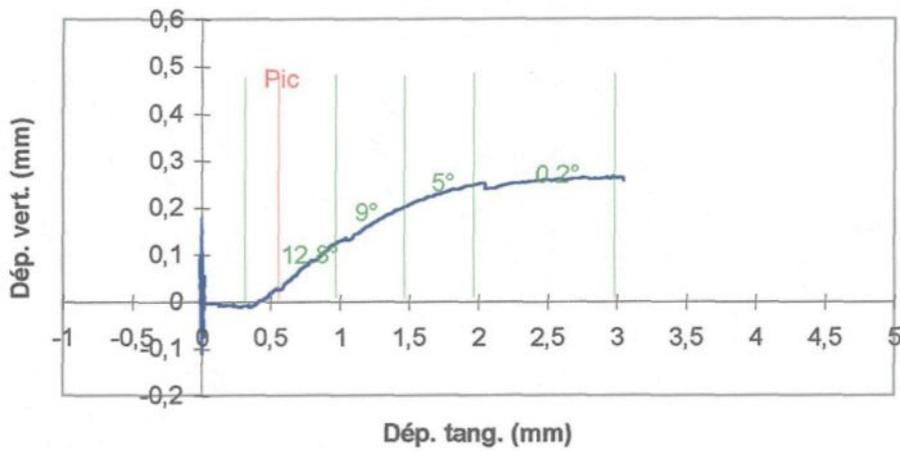




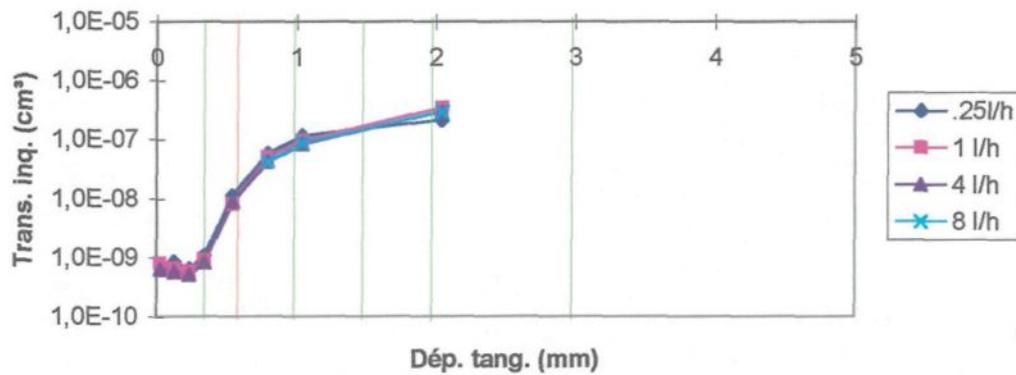
Contrainte tang. vs. dép. tang. (R19)

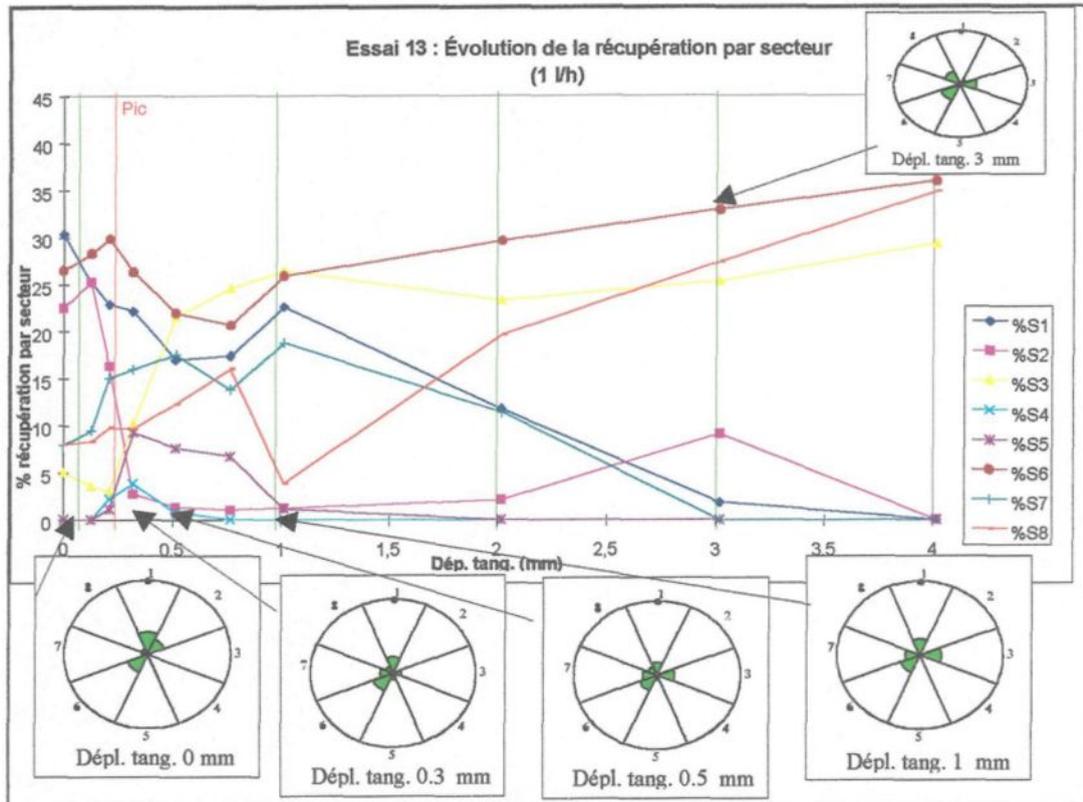
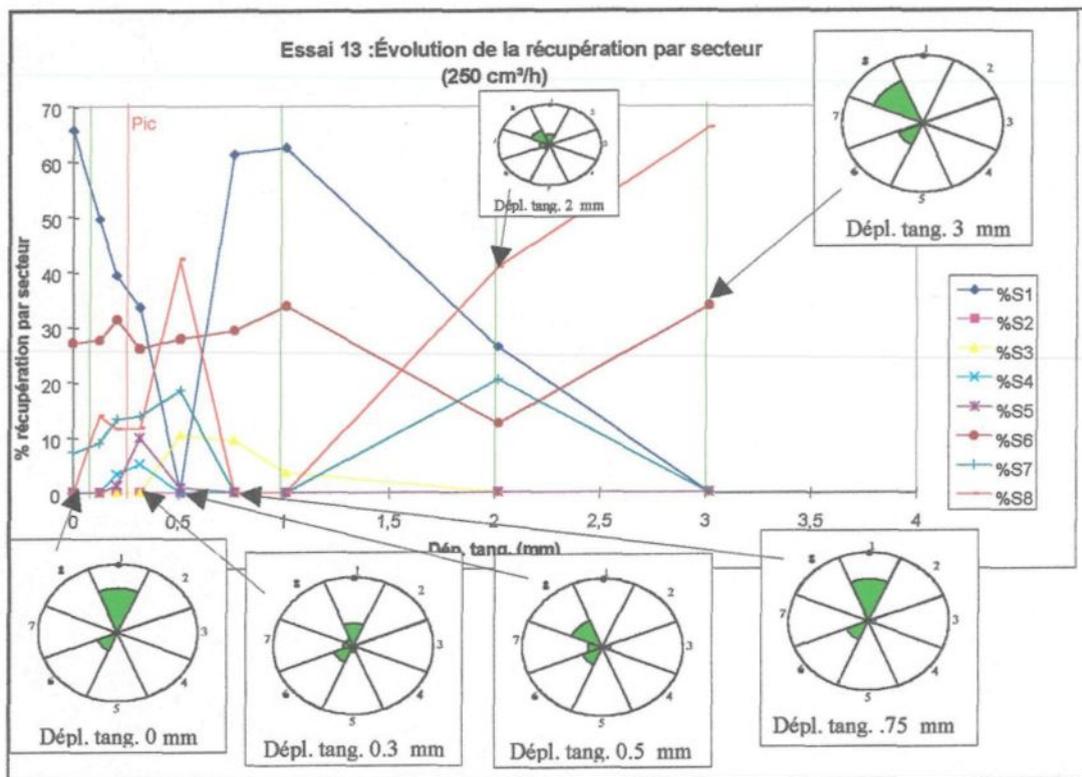


Dilatance (R19, 9 MPa, 180°)

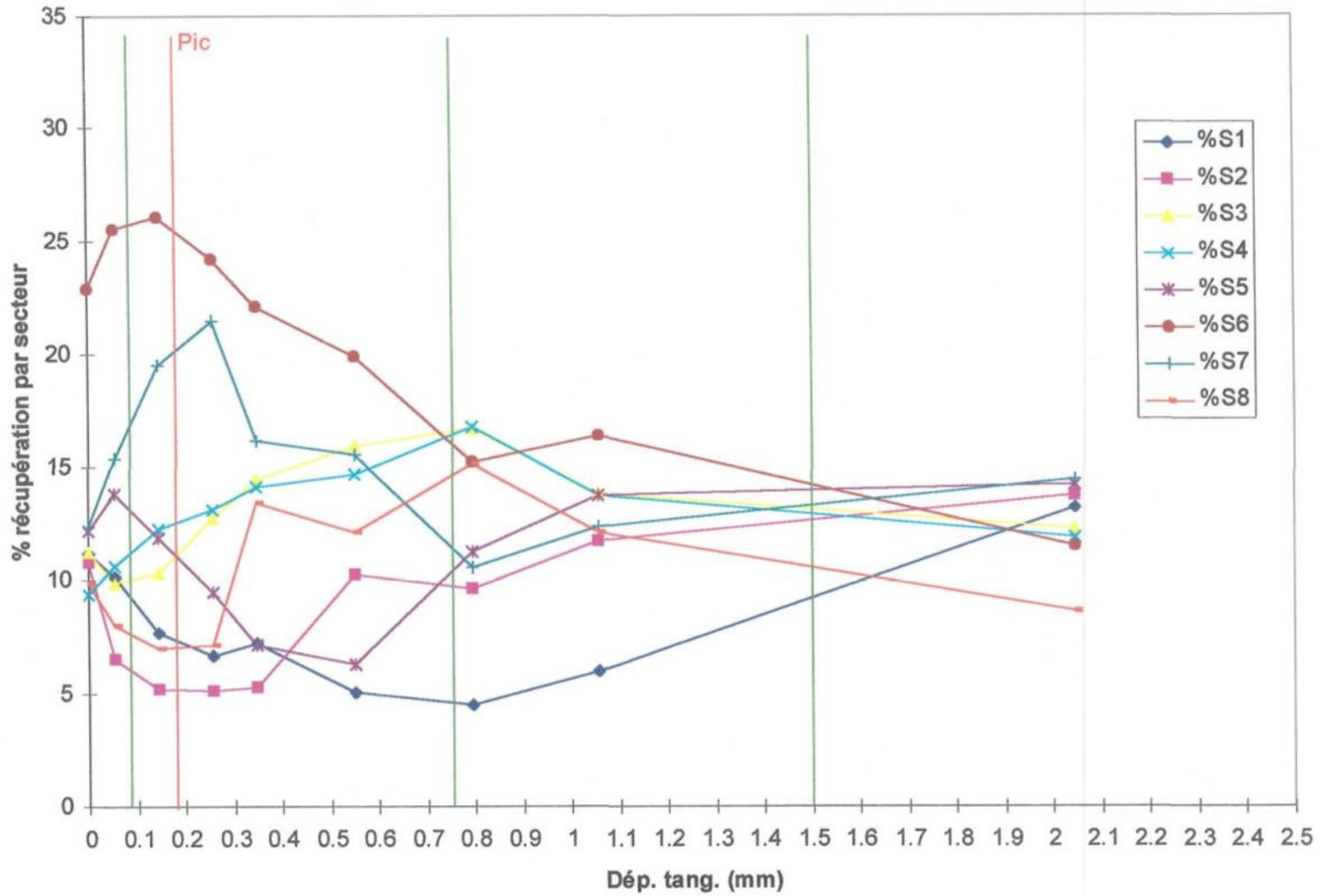


Dép. tang. vs. trans. inq.

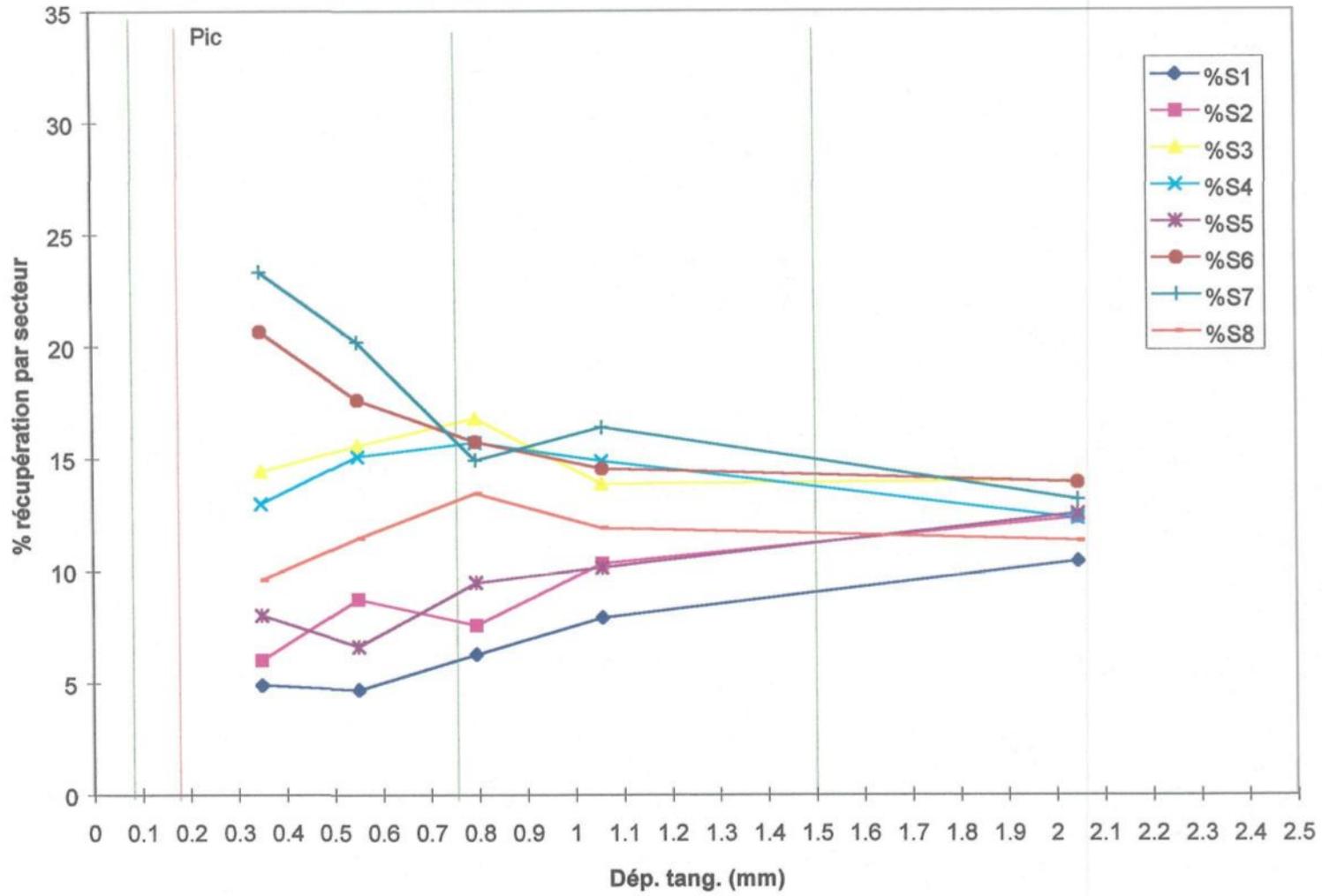


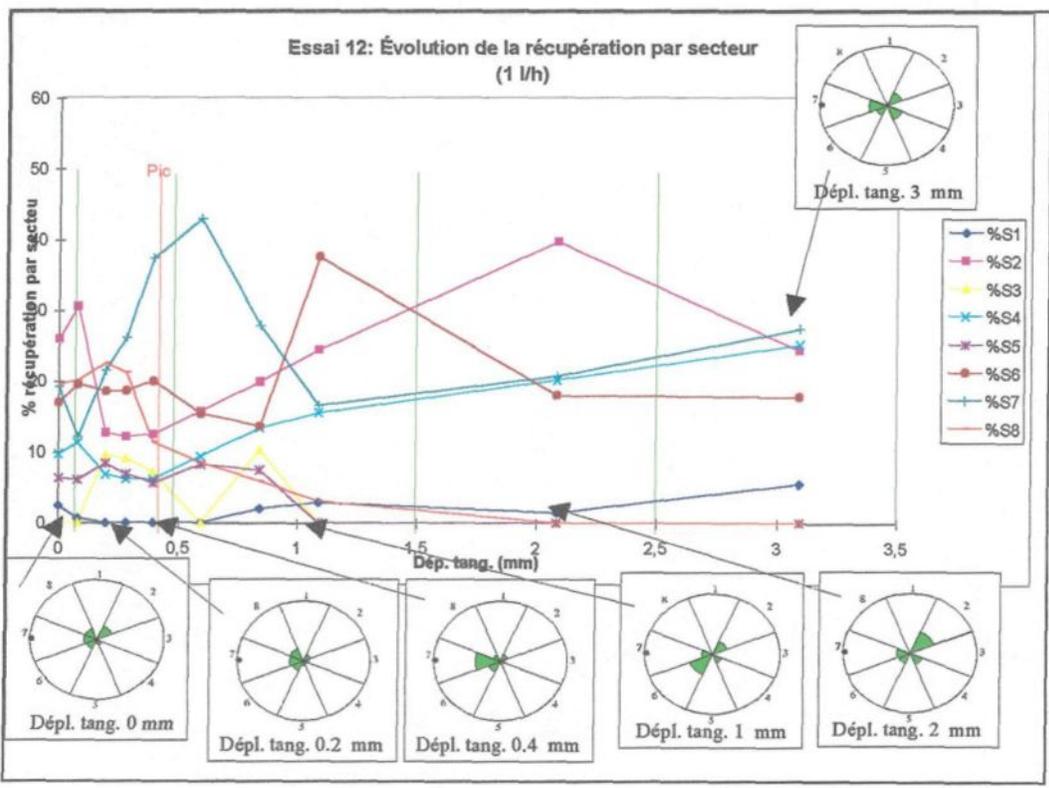
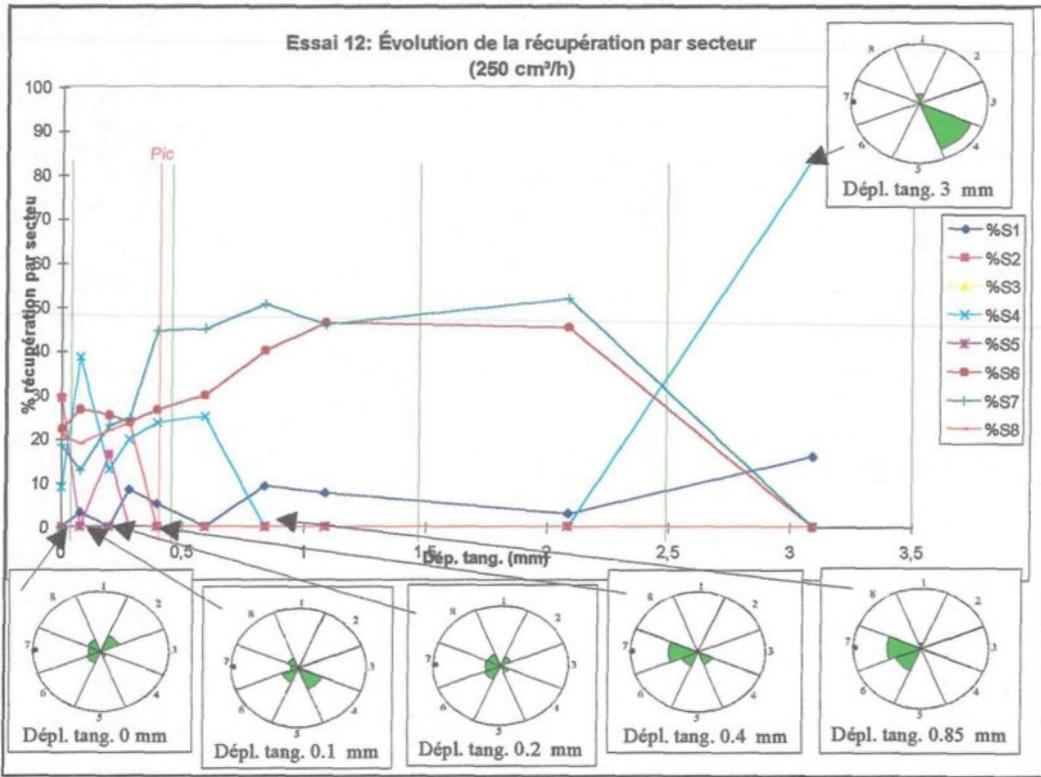


Essai 13: Évolution de la récupération par secteur (4 l/h)

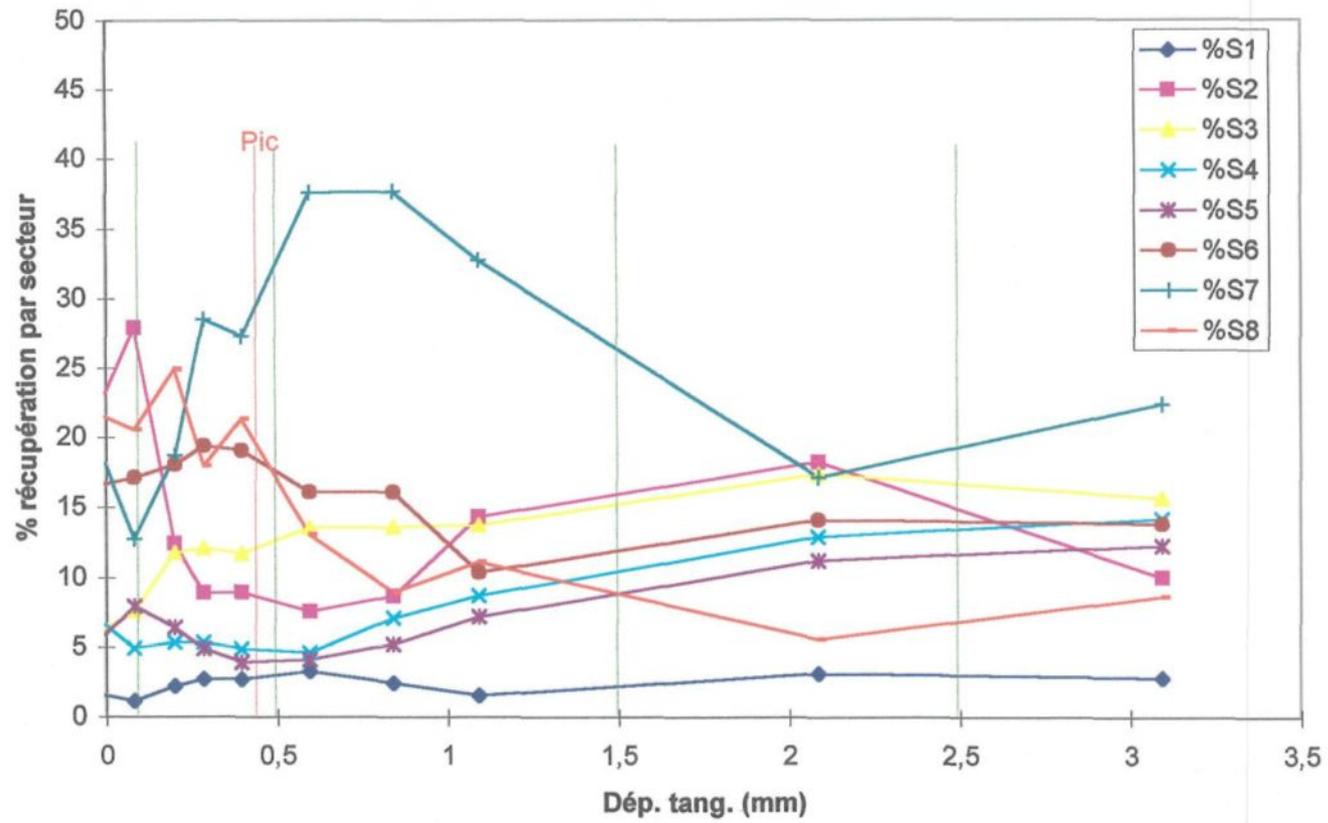


Essai 13: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)

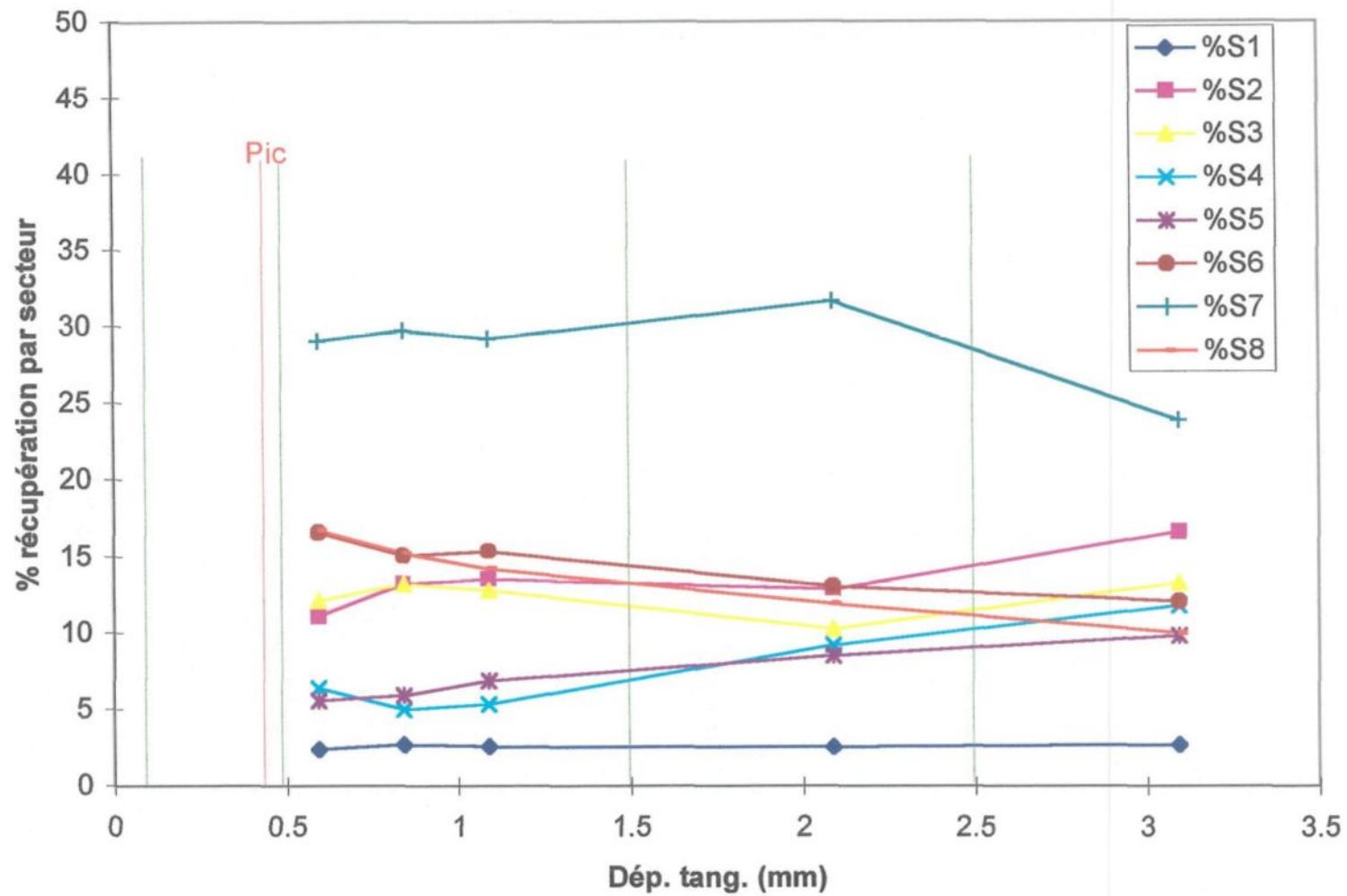


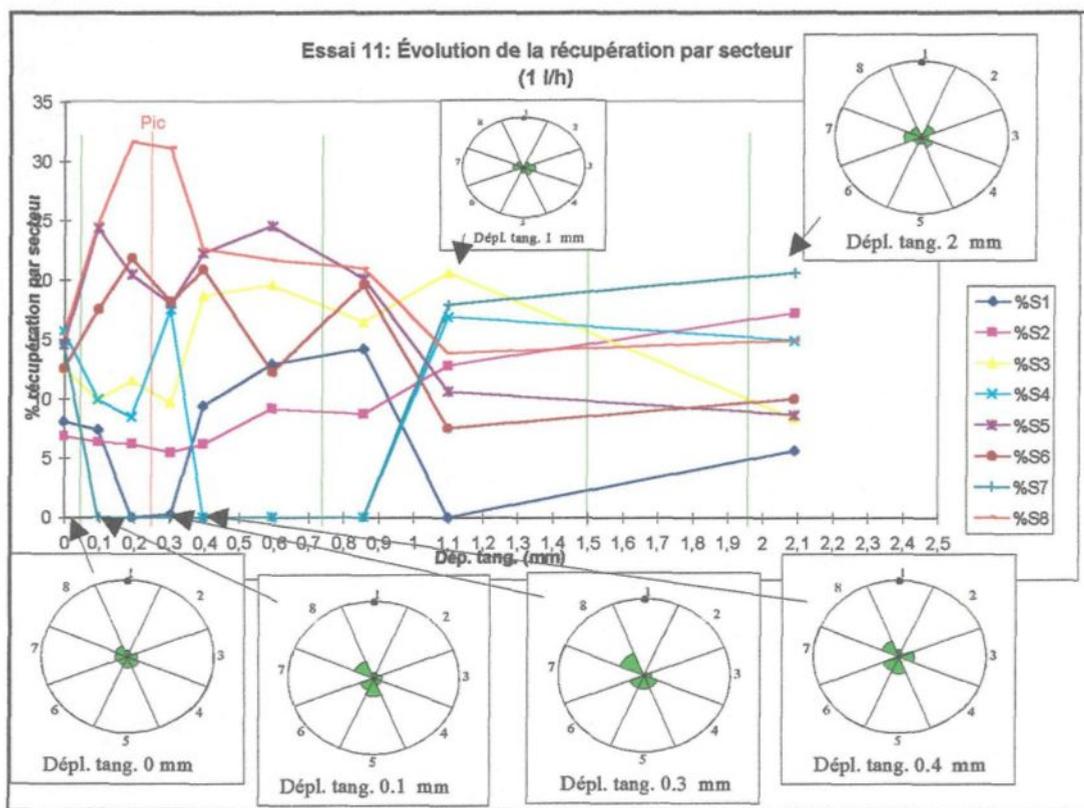
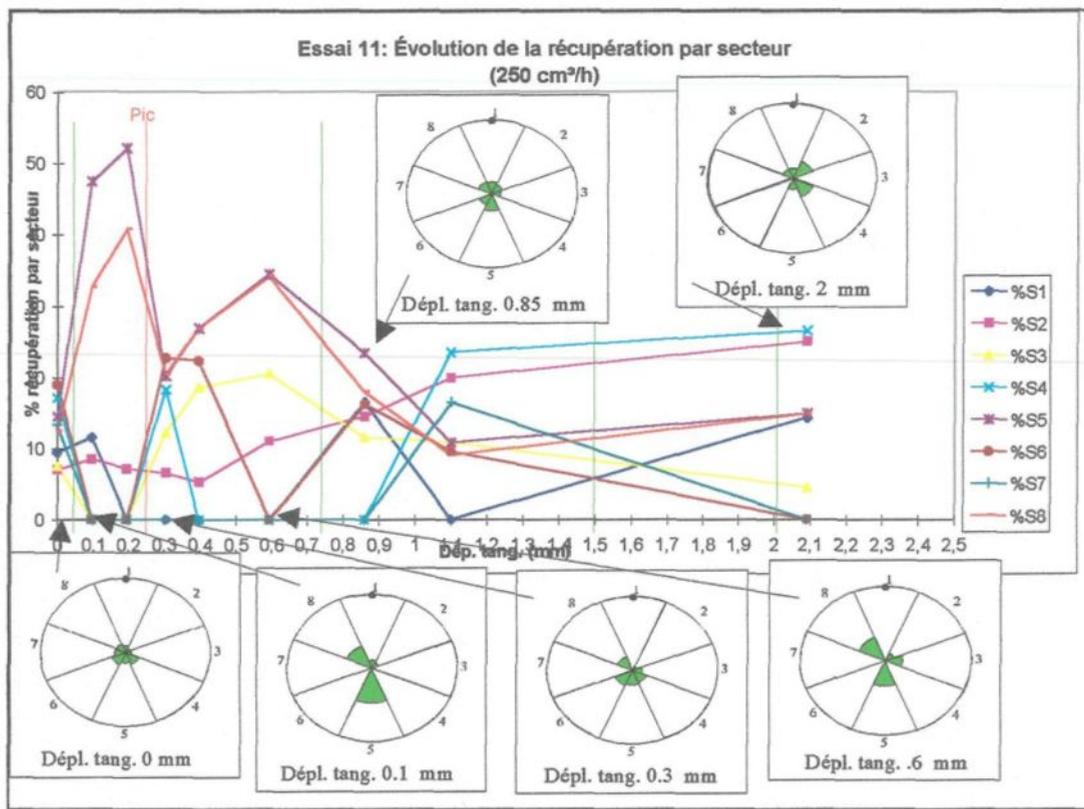


Essai 12: Évolution de la récupération par secteur (4 l/h)

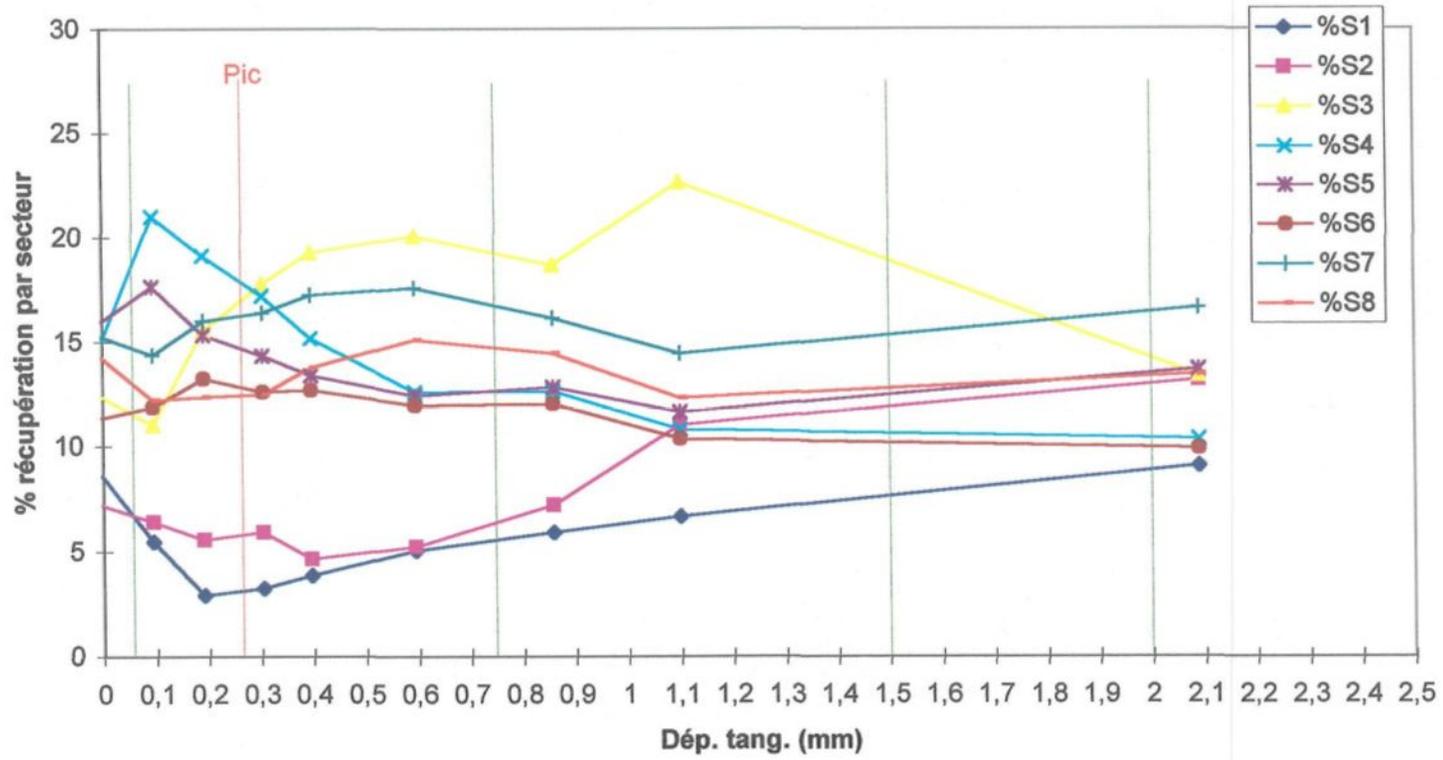


Essai 12: Évolution de la récupération par secteur (8 l/h)

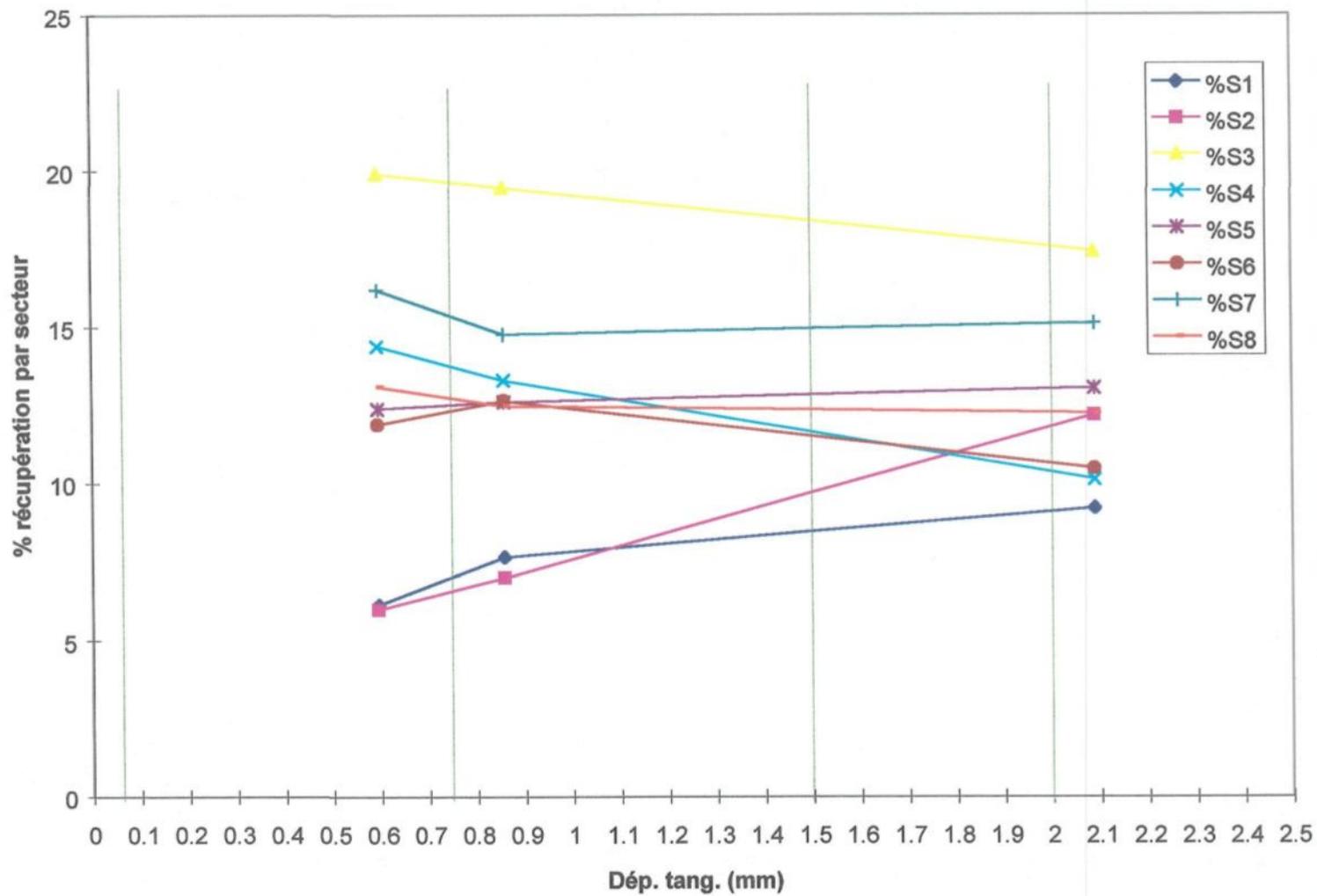


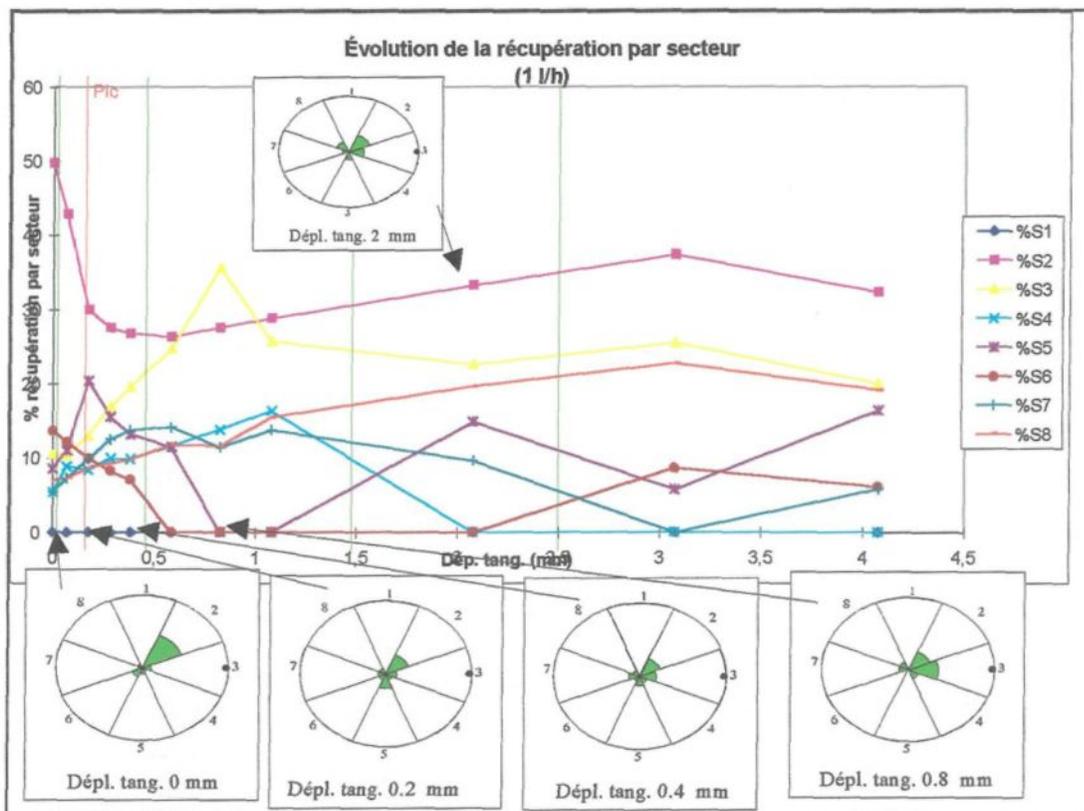
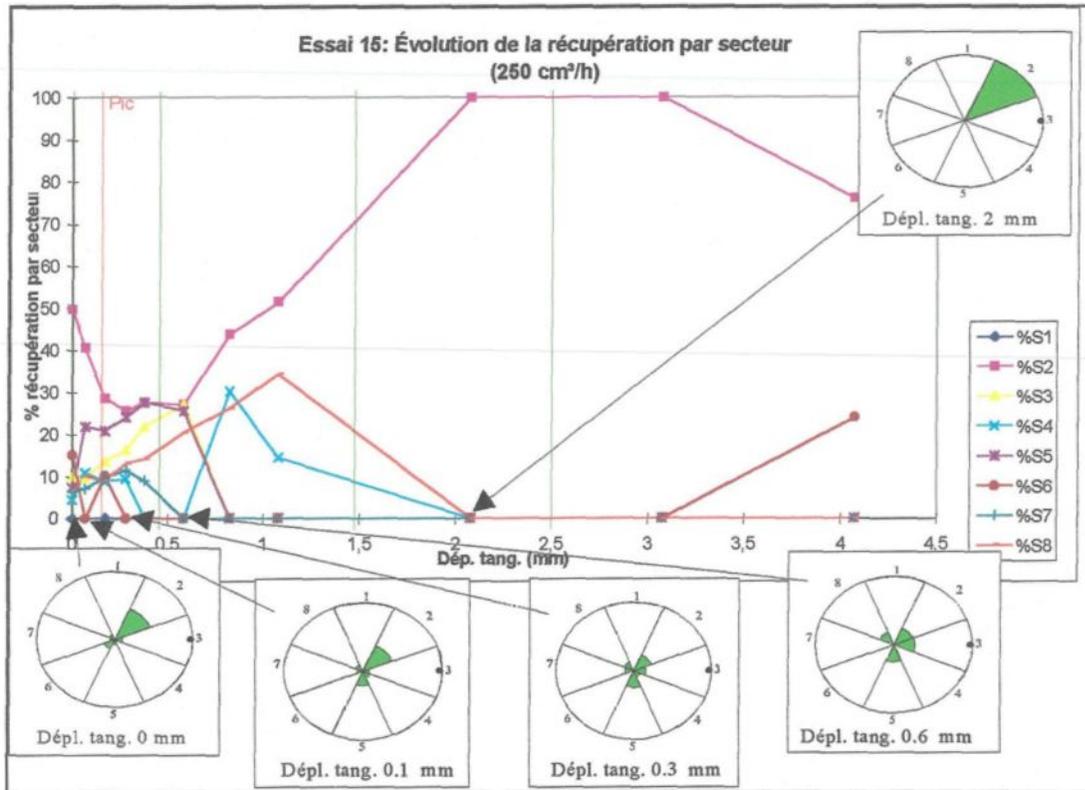


Essai 11: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)

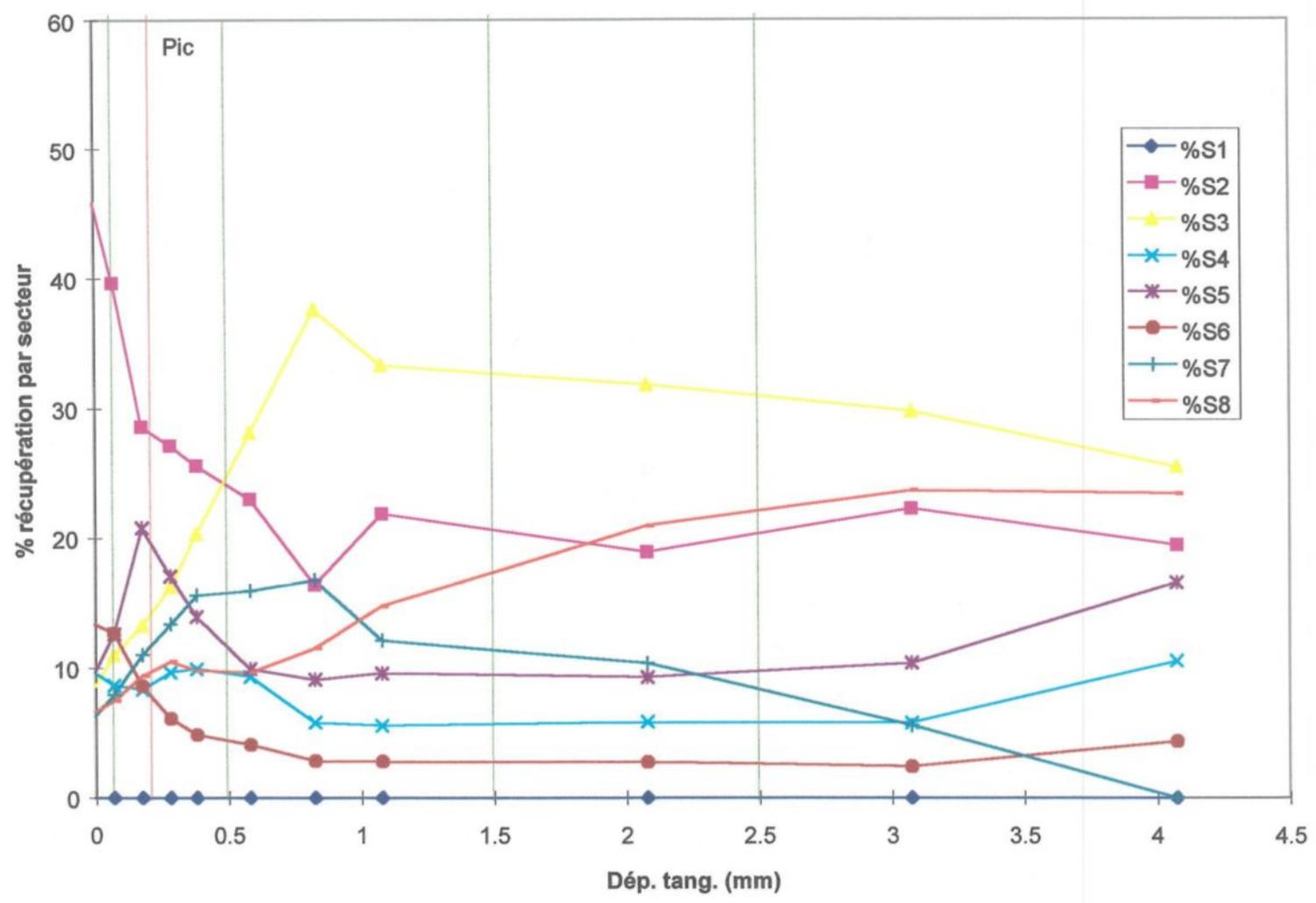


Essai 11: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)

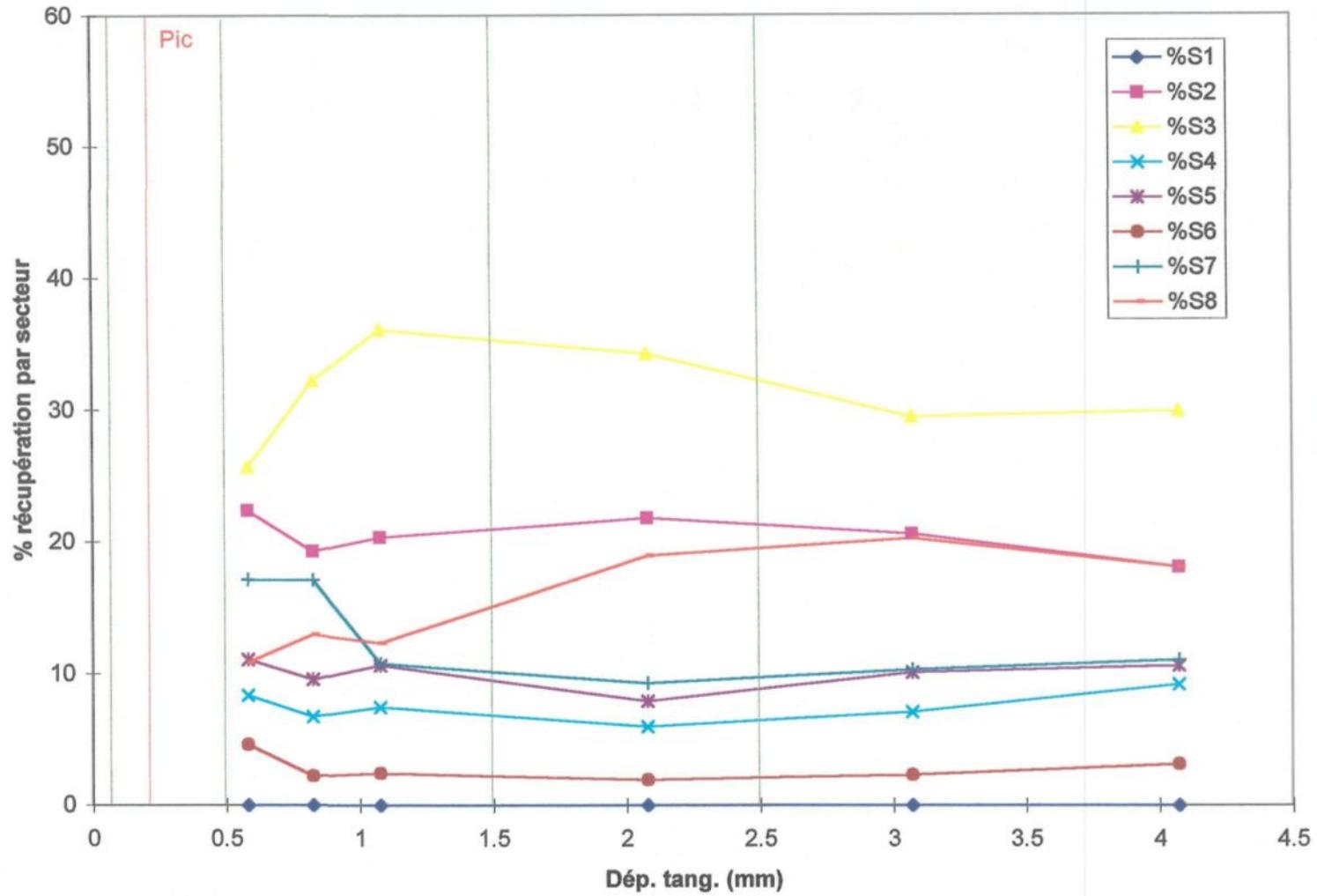




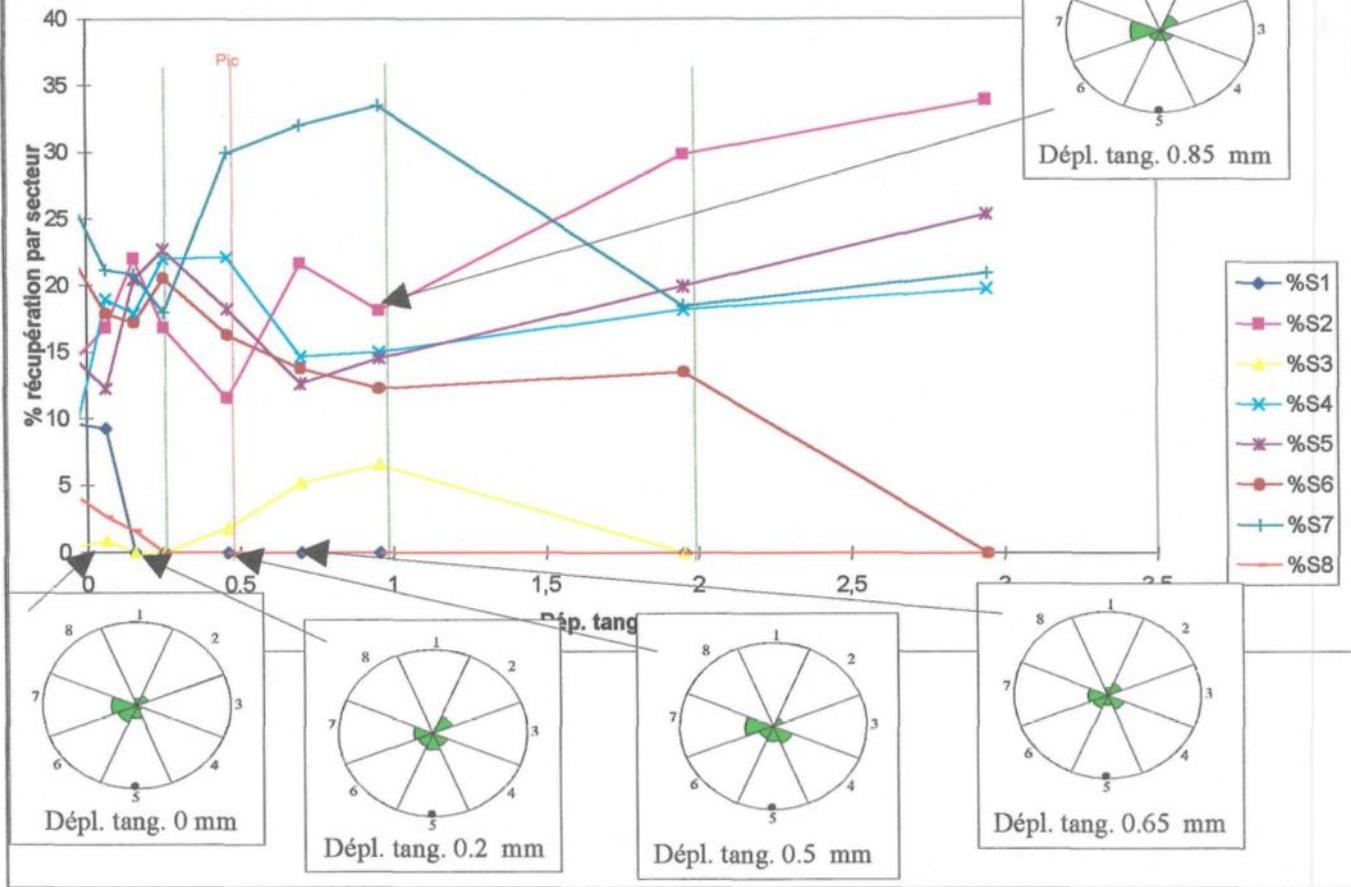
Essai 15: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)



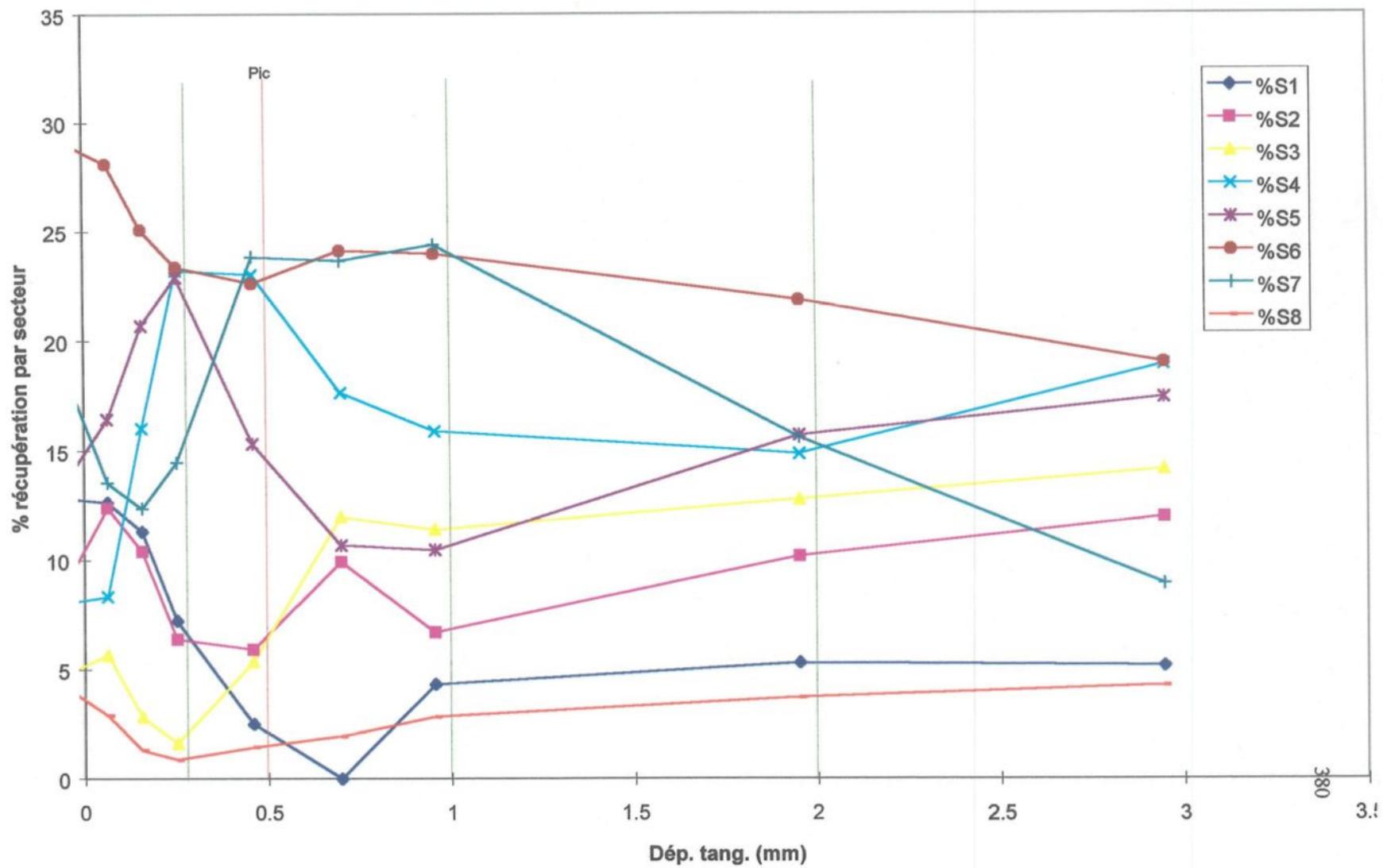
Essai 15: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)



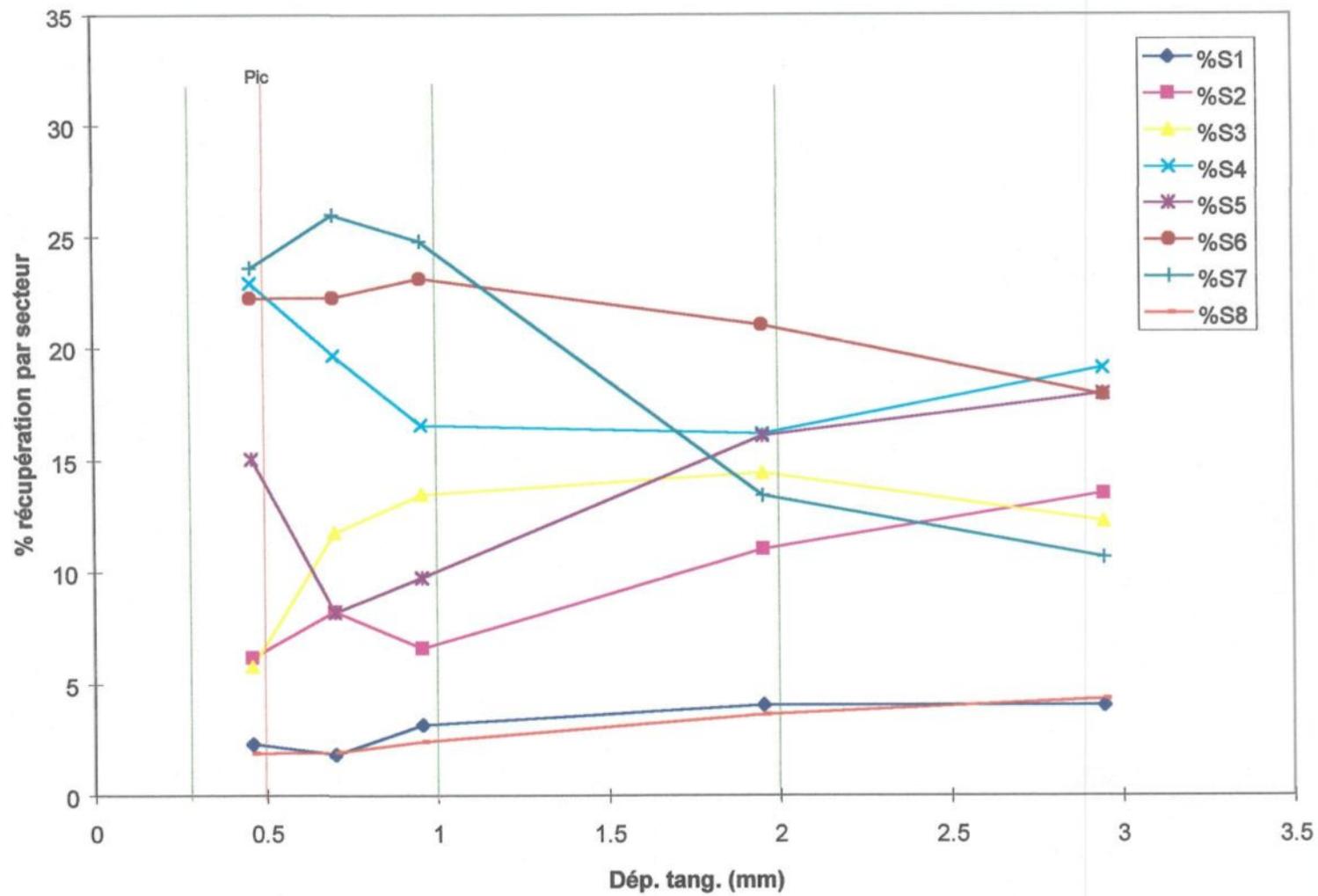
Essai 6: Évolution de la récupération par secteur (1 l/h)



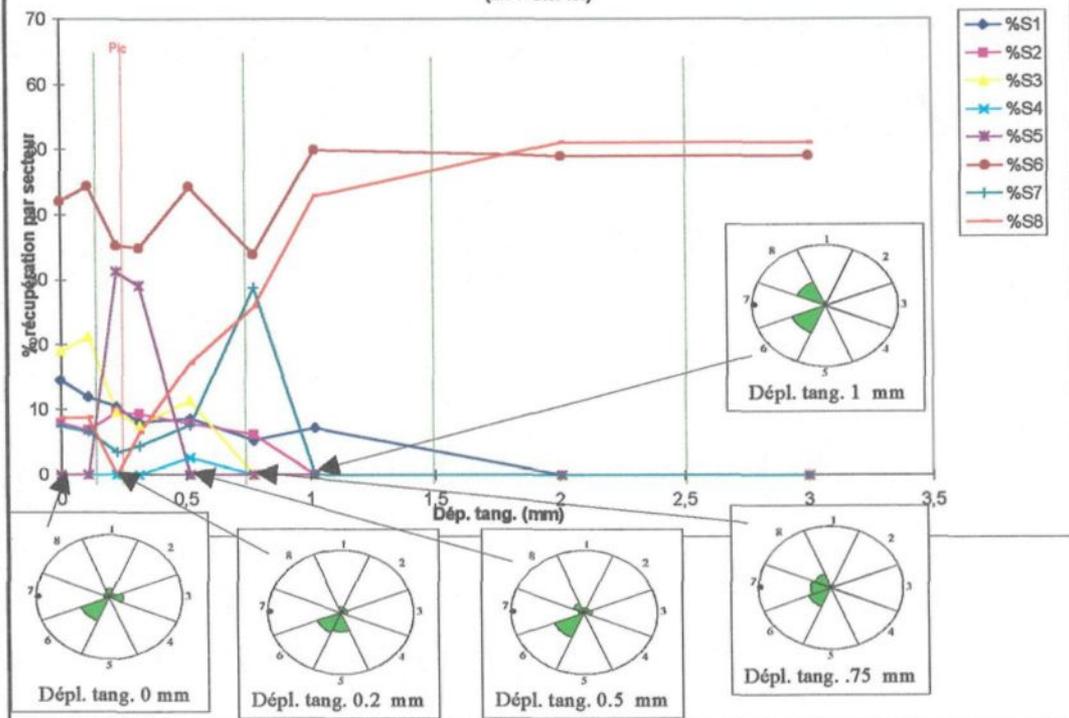
Essai 6: Évolution de la récupération par secteur (4 l/h)



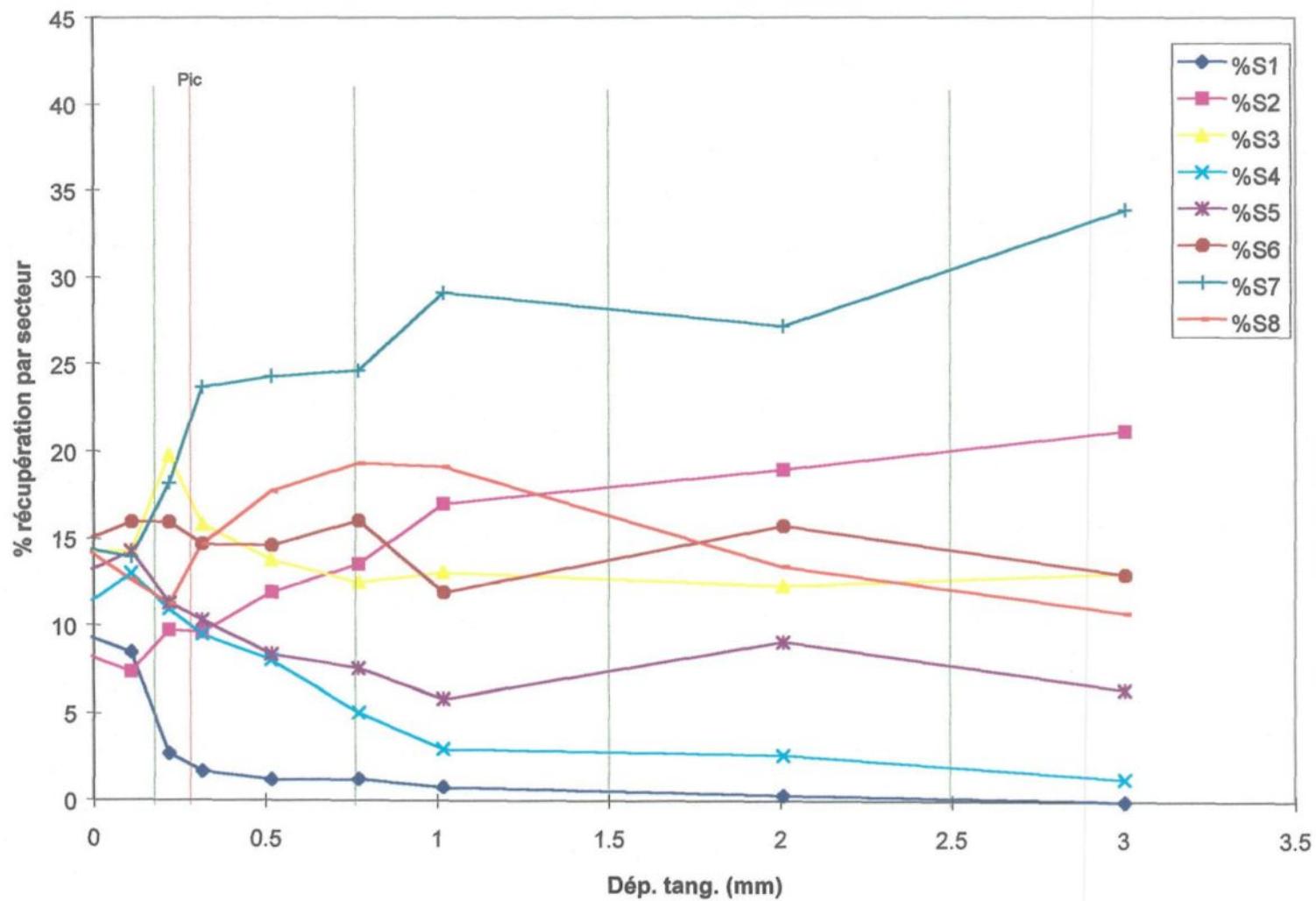
Essai 6: Évolution de la récupération par secteur
(6 l/h)



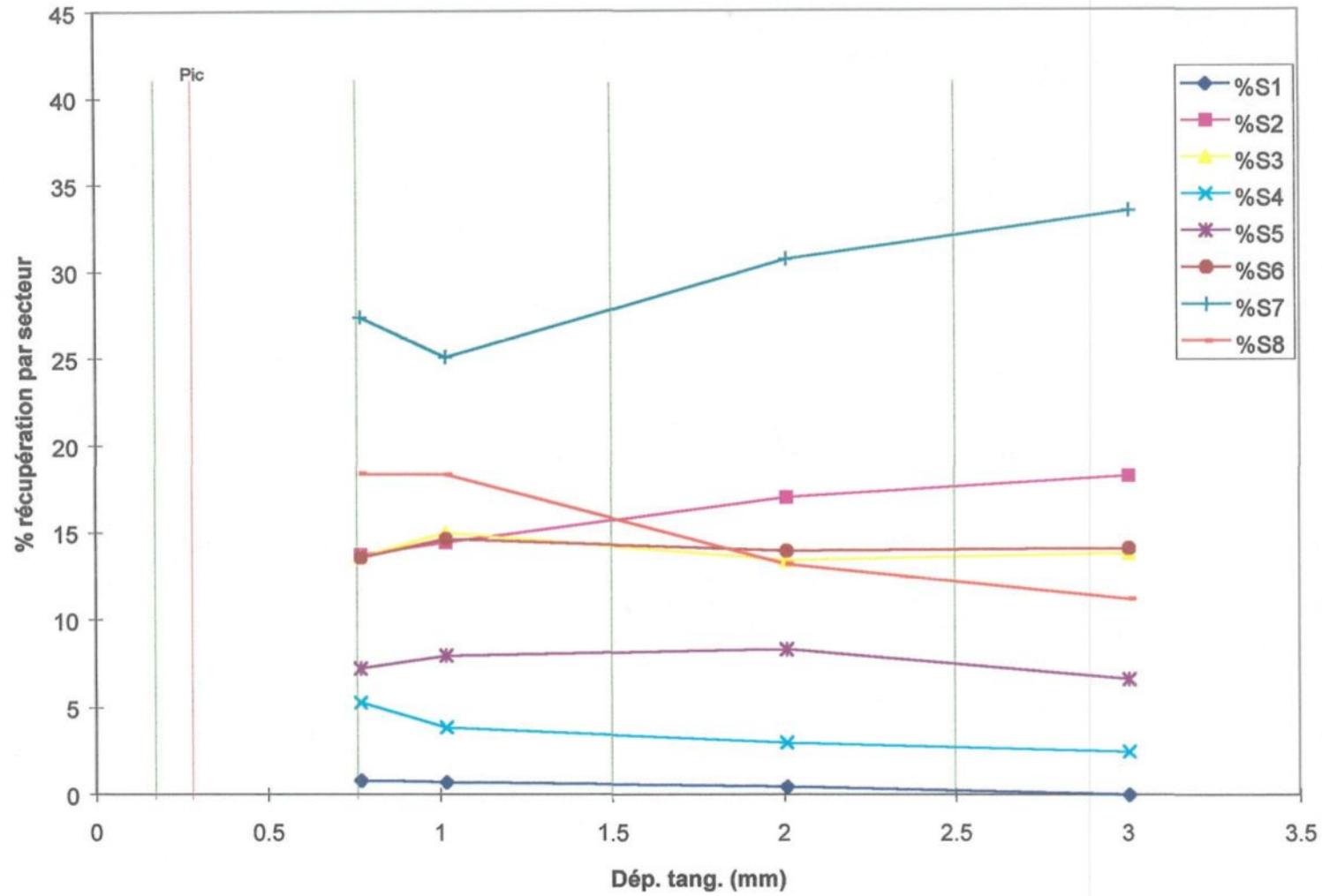
Essai 8: Évolution de la récupération par secteur
(250 cm²/h)

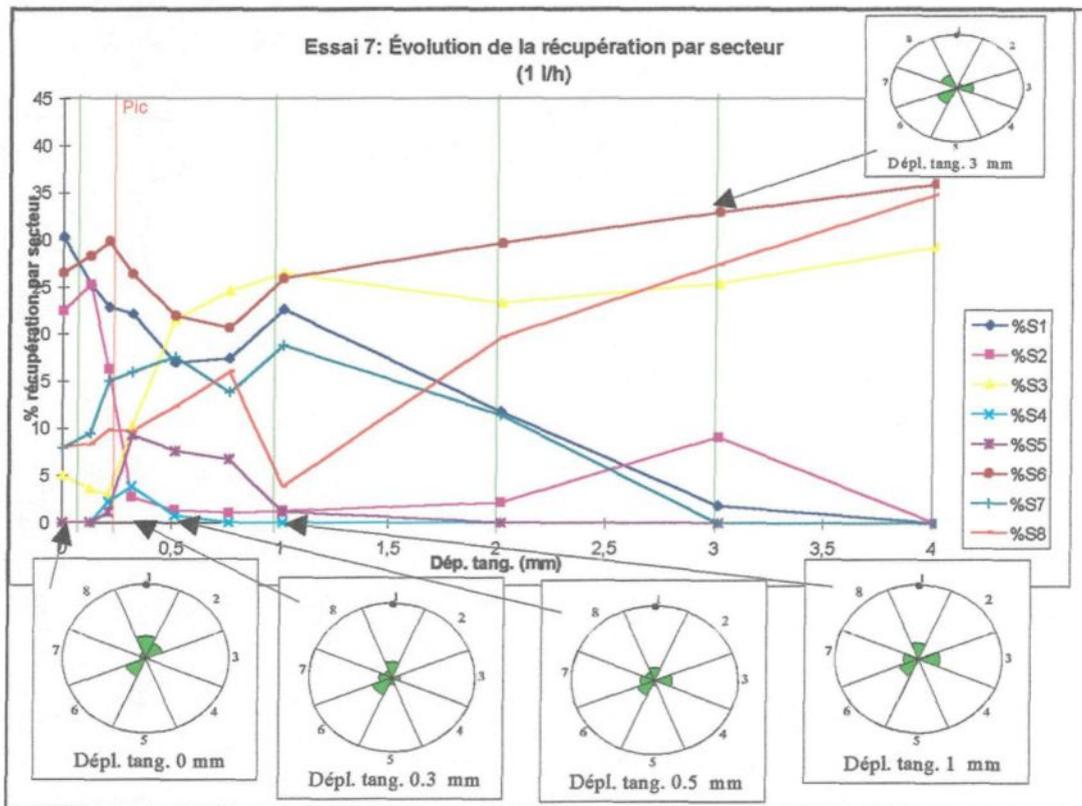
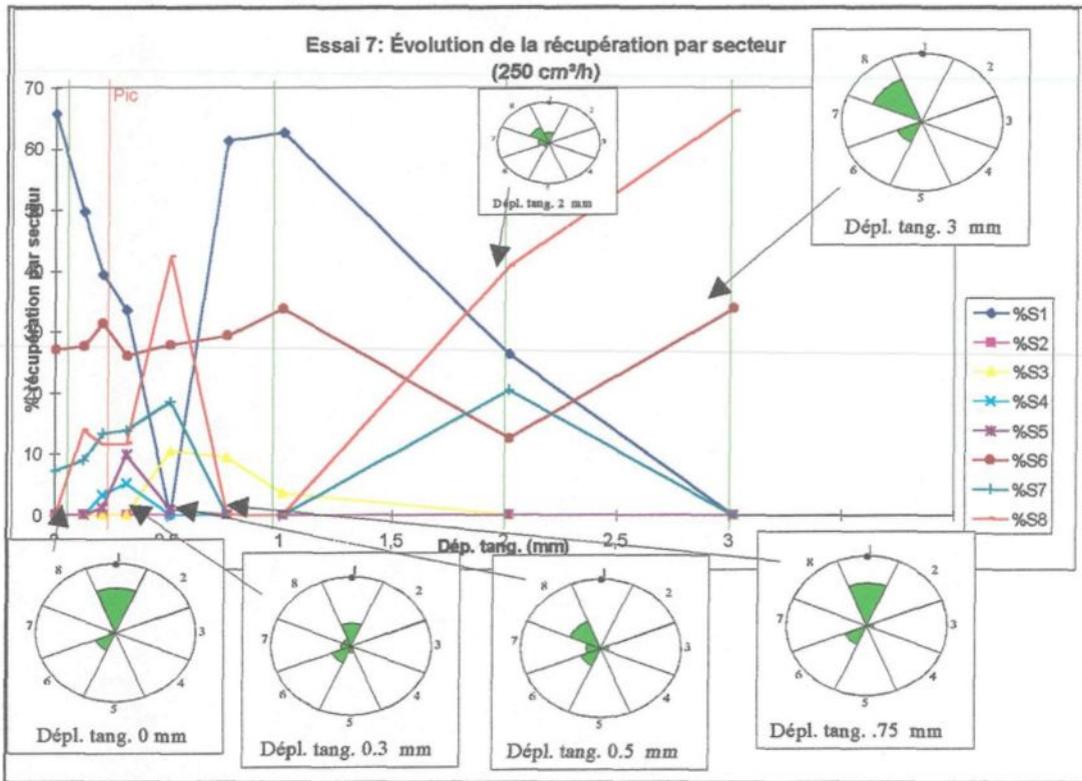


Essai 8: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)

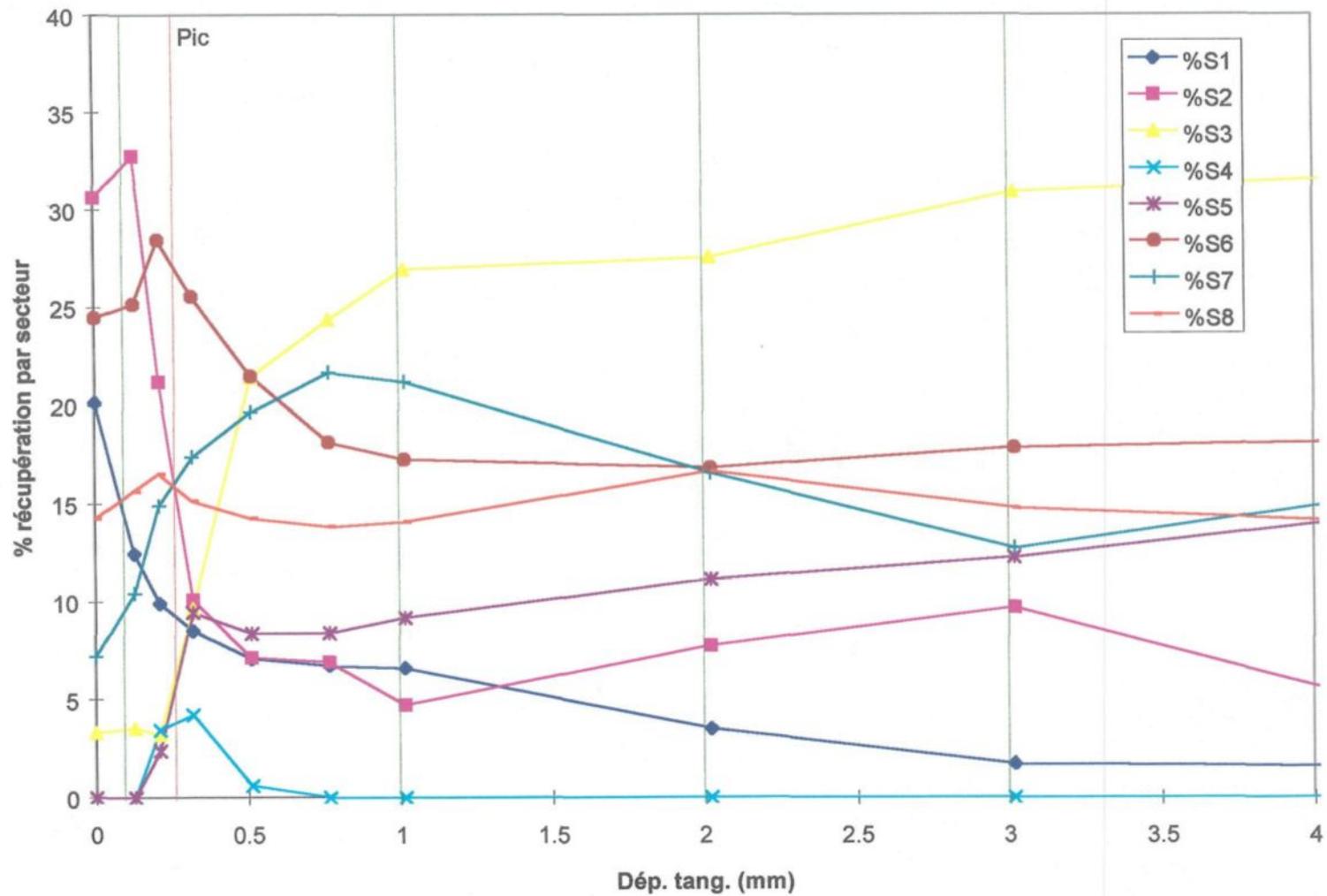


Essai 8: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)

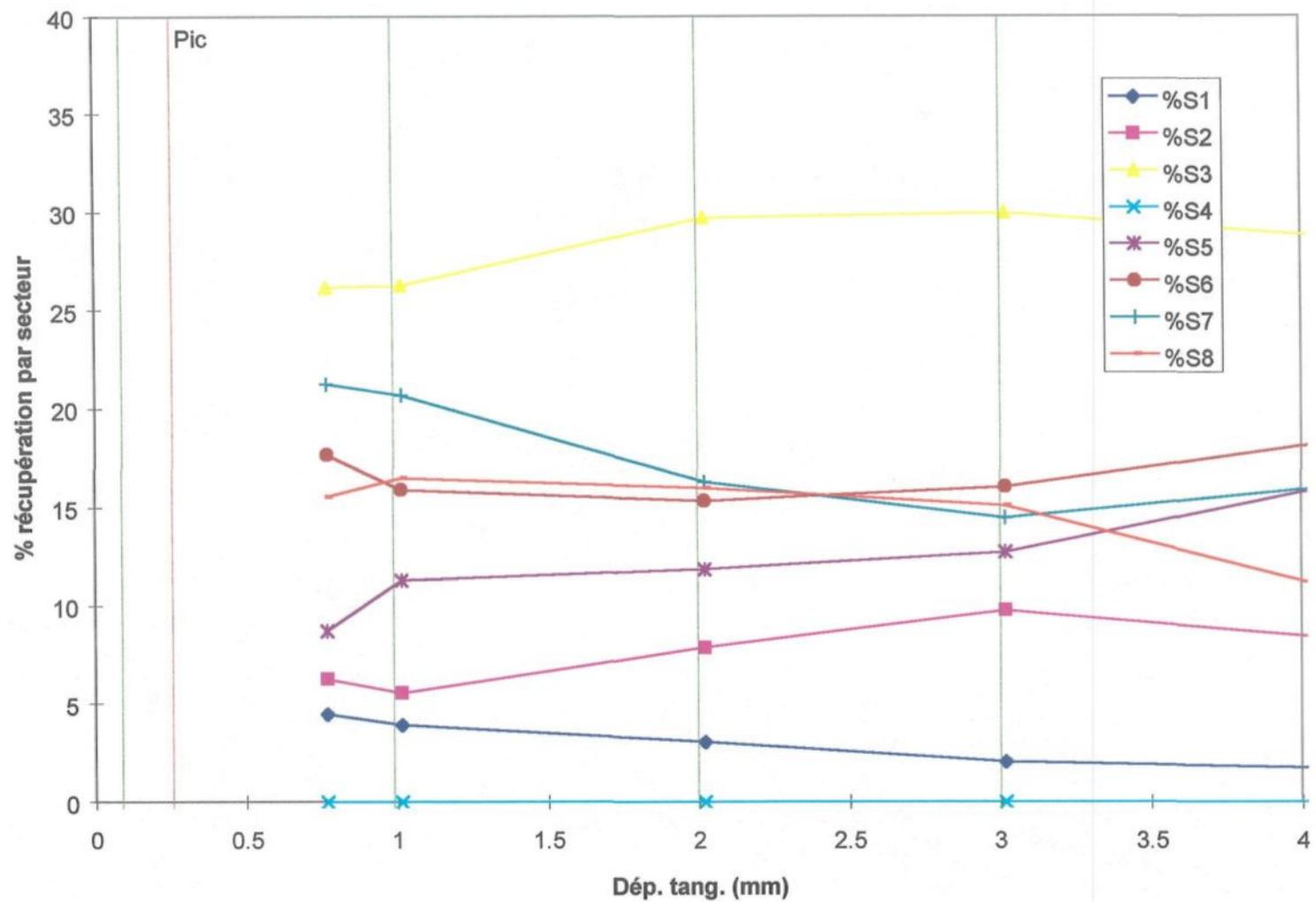




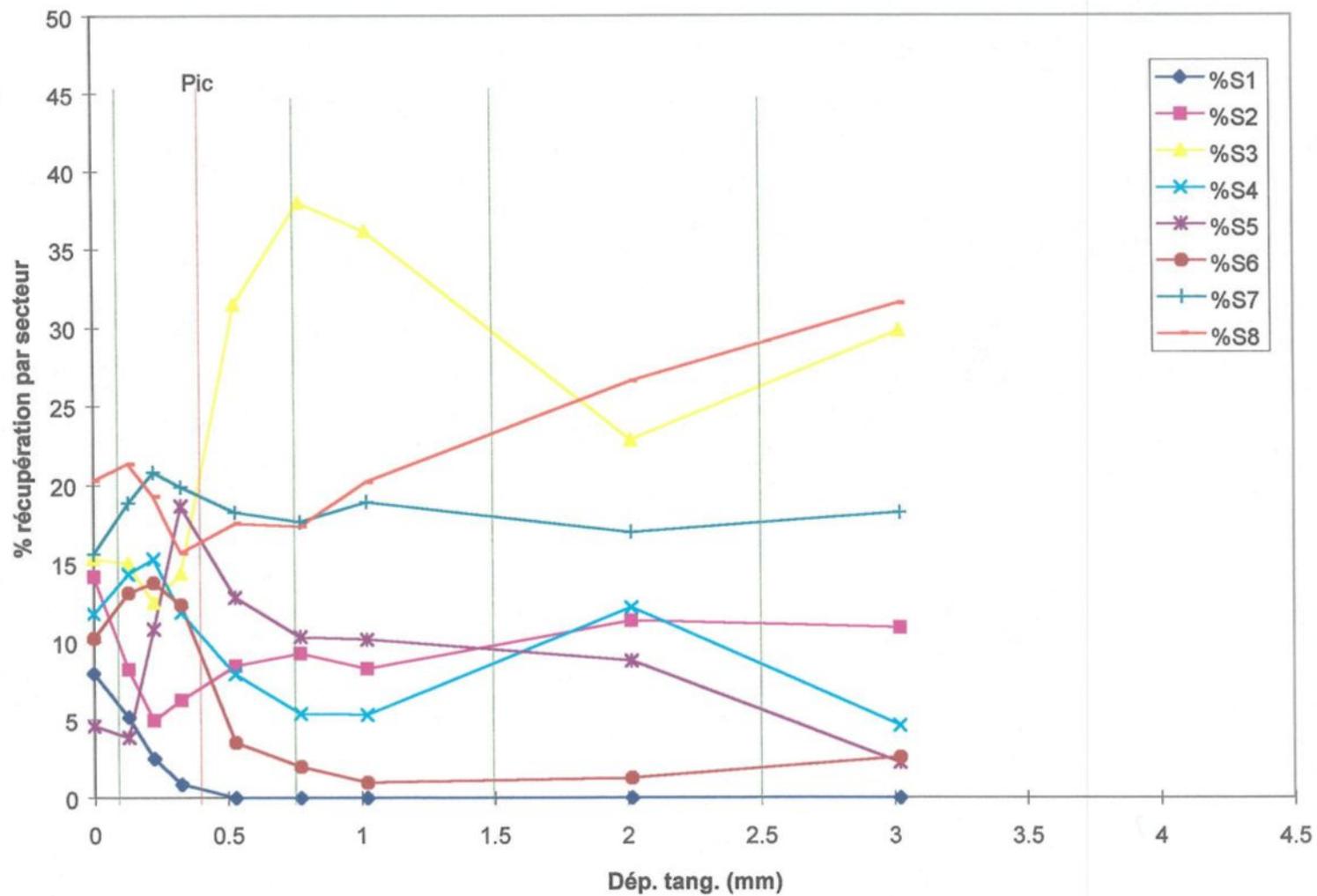
Essai 7: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)



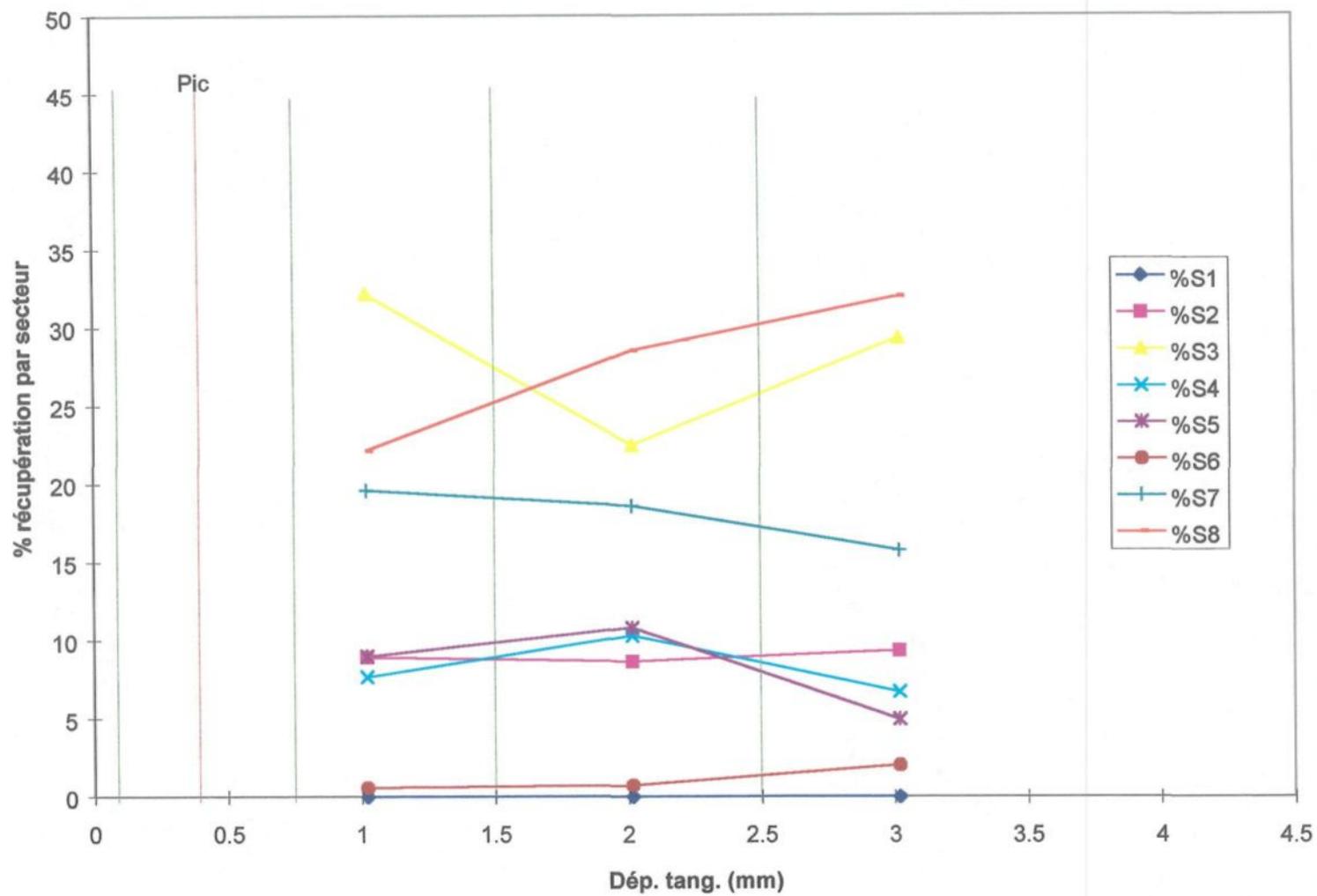
Essai 7: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)

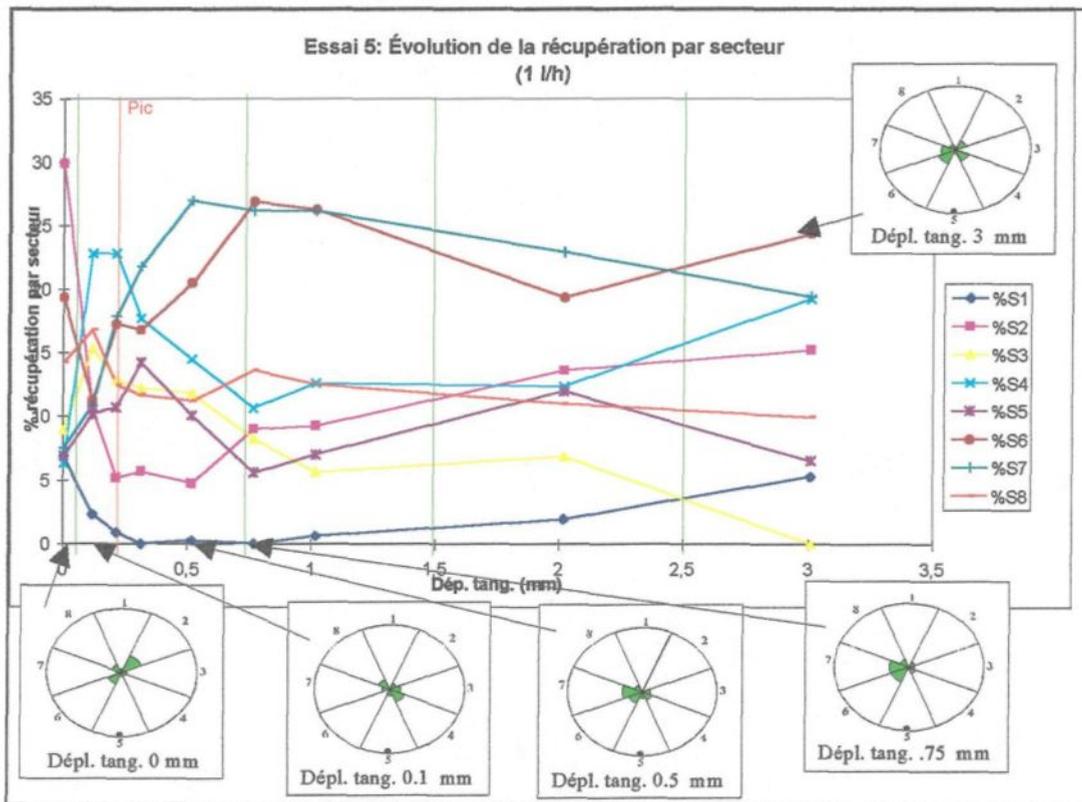
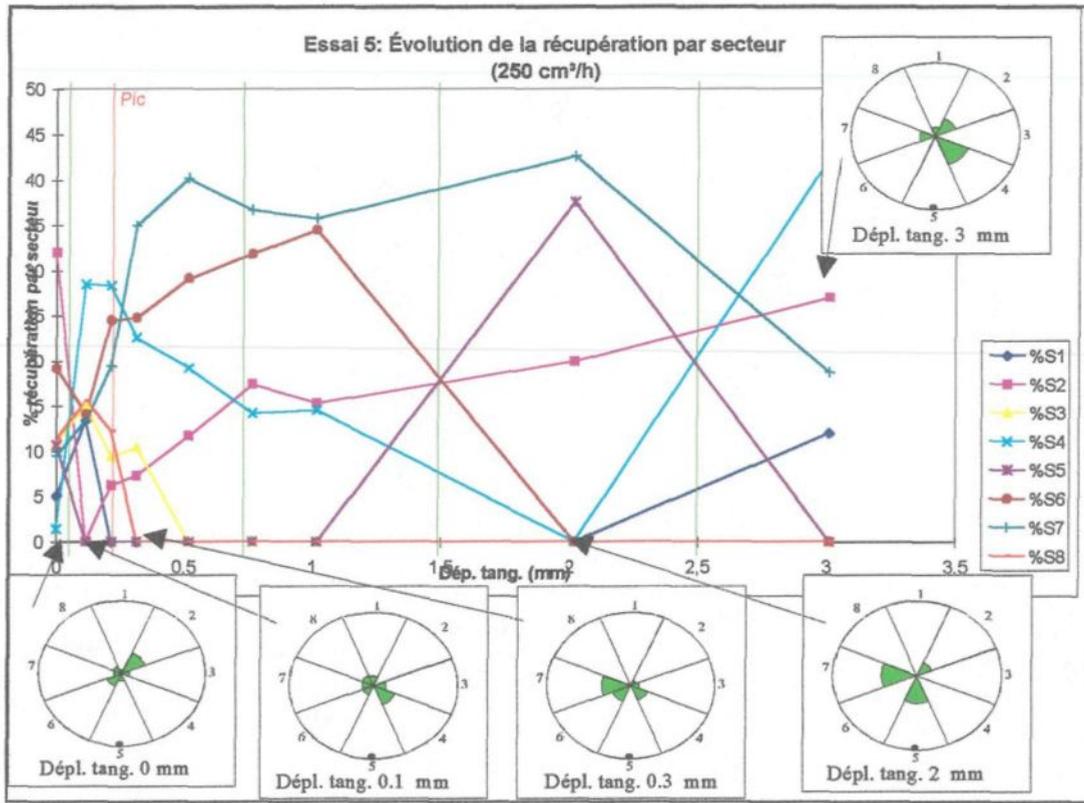


Essai 10: Évolution de la récupération par secteur (4 l/h)

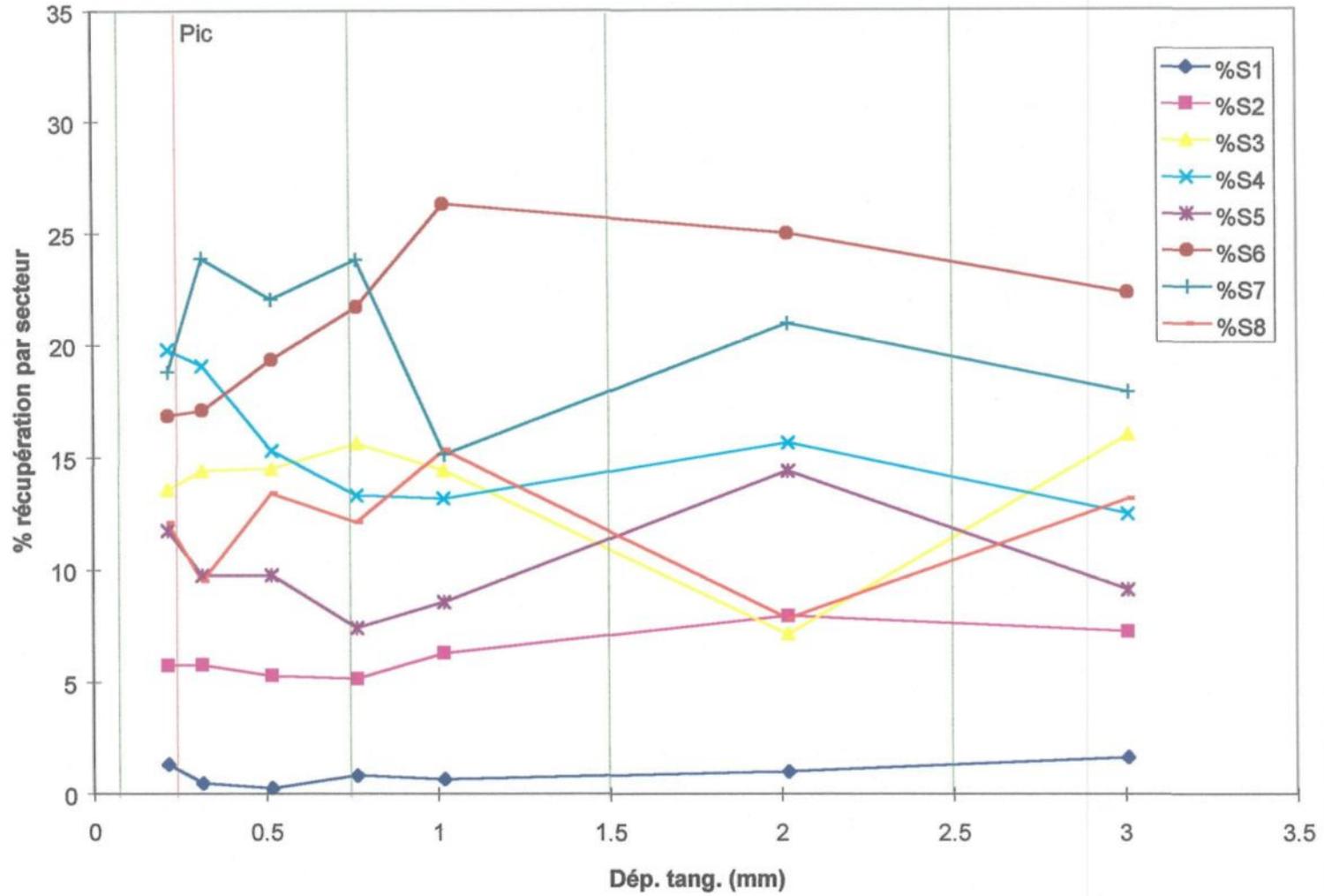


Essai 10: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)

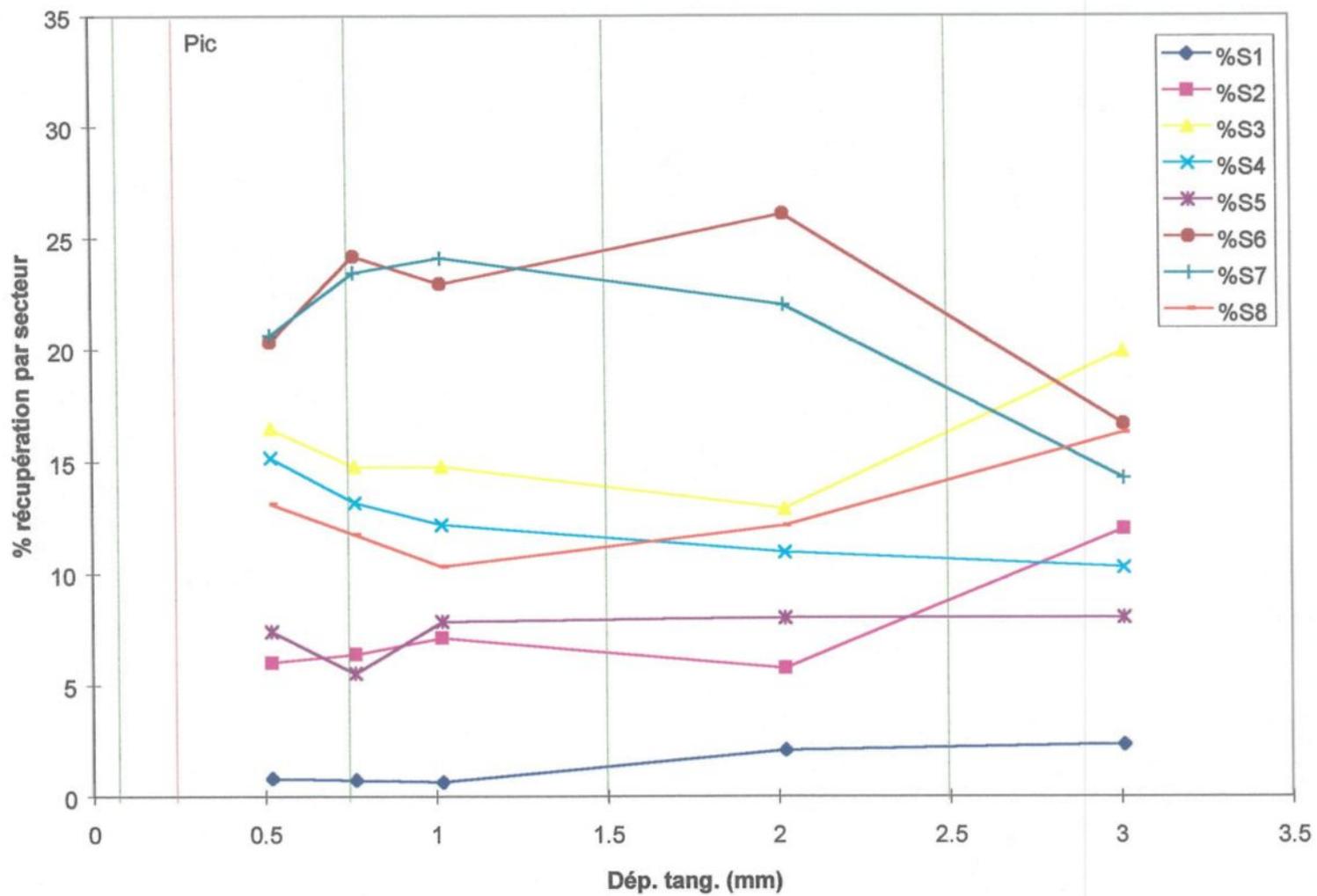




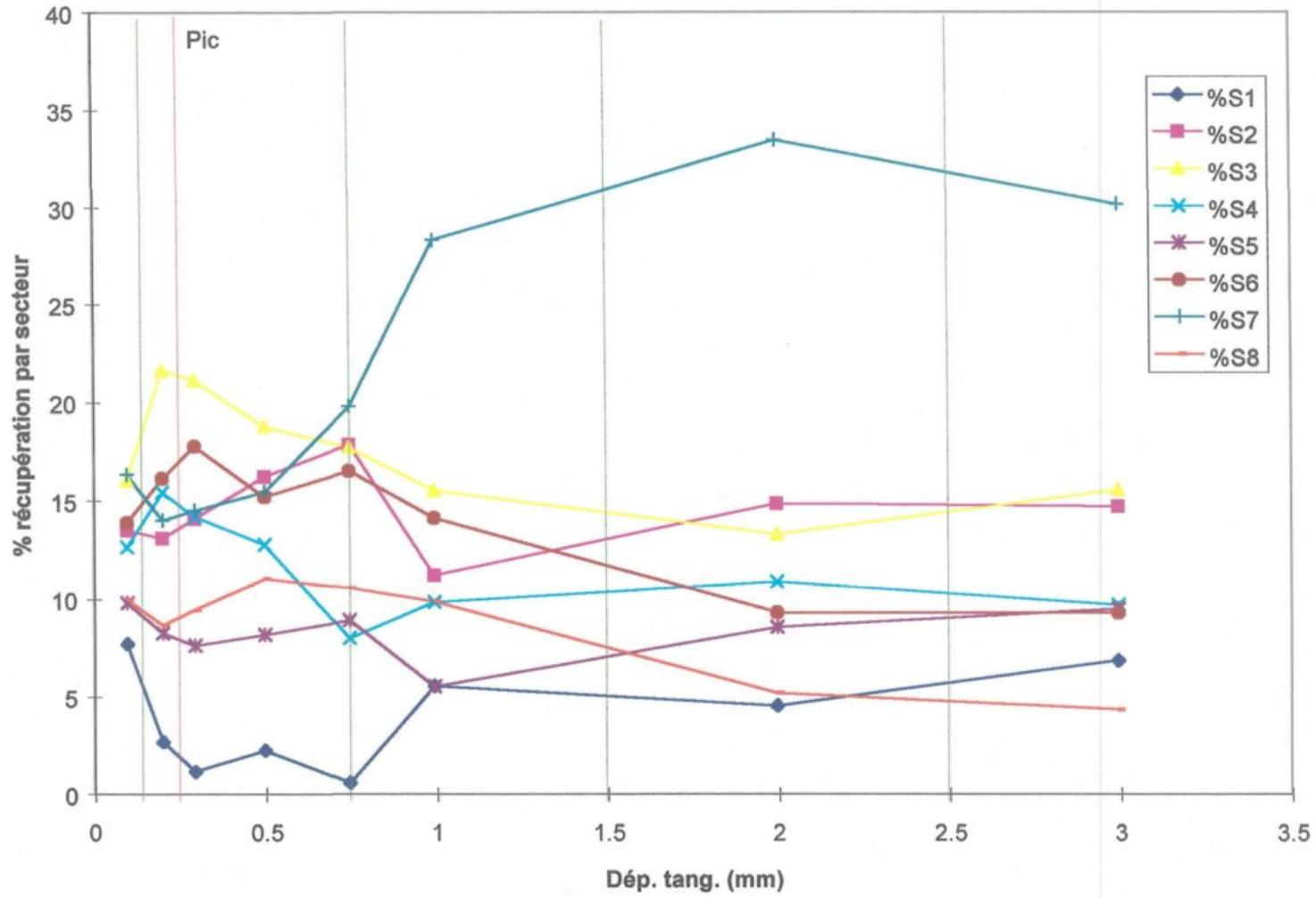
Essai 5: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)



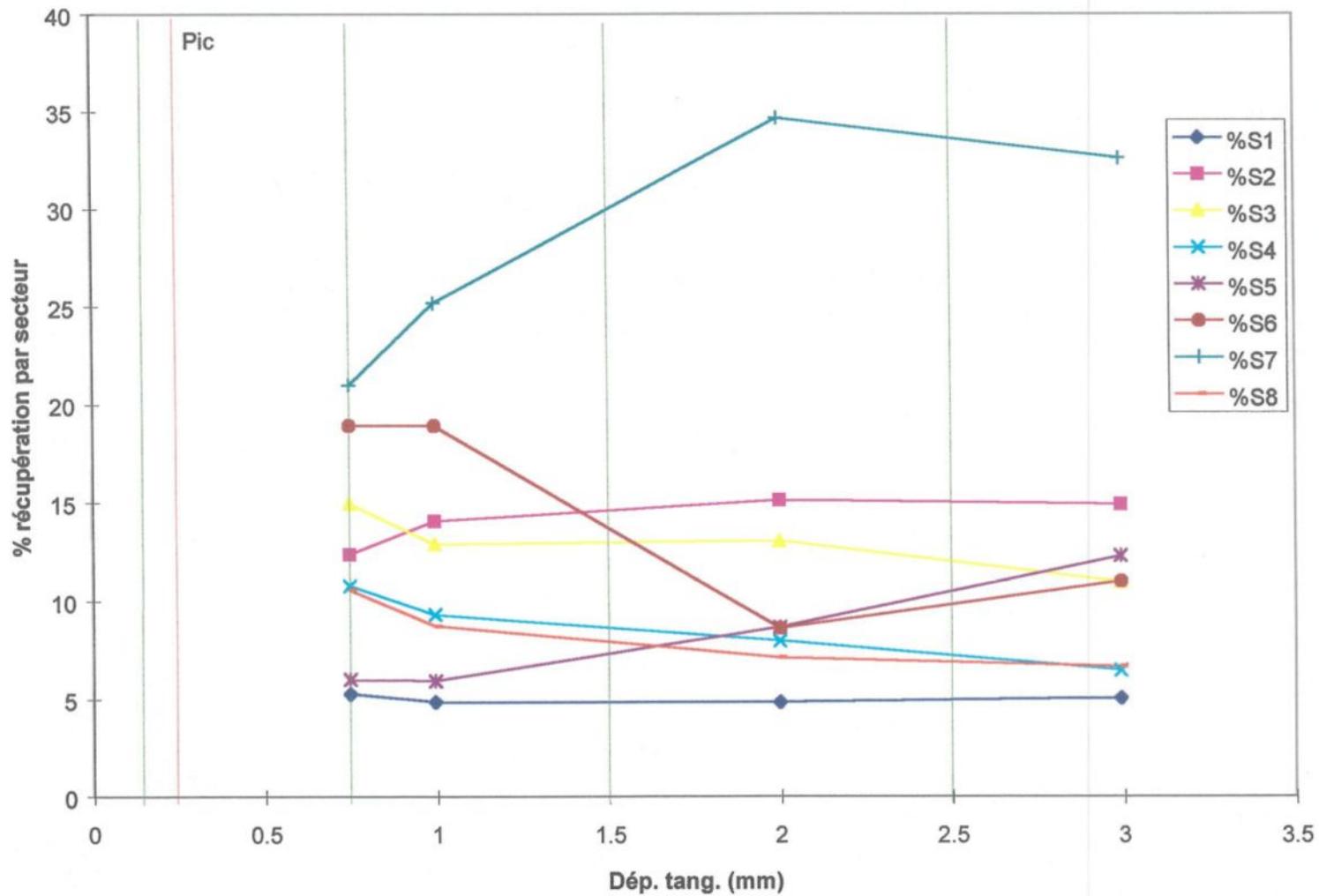
Essai 5: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)



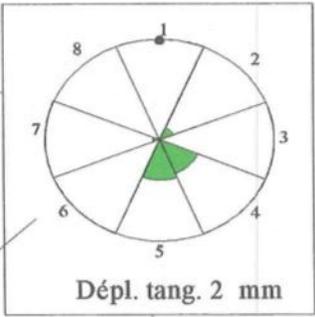
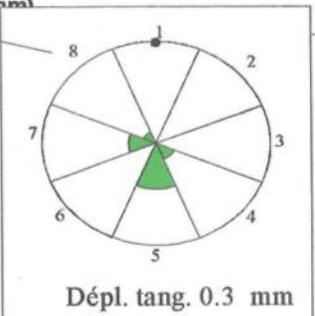
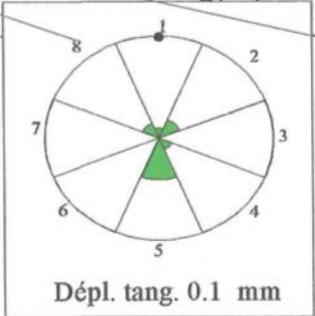
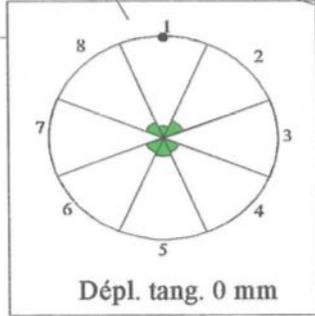
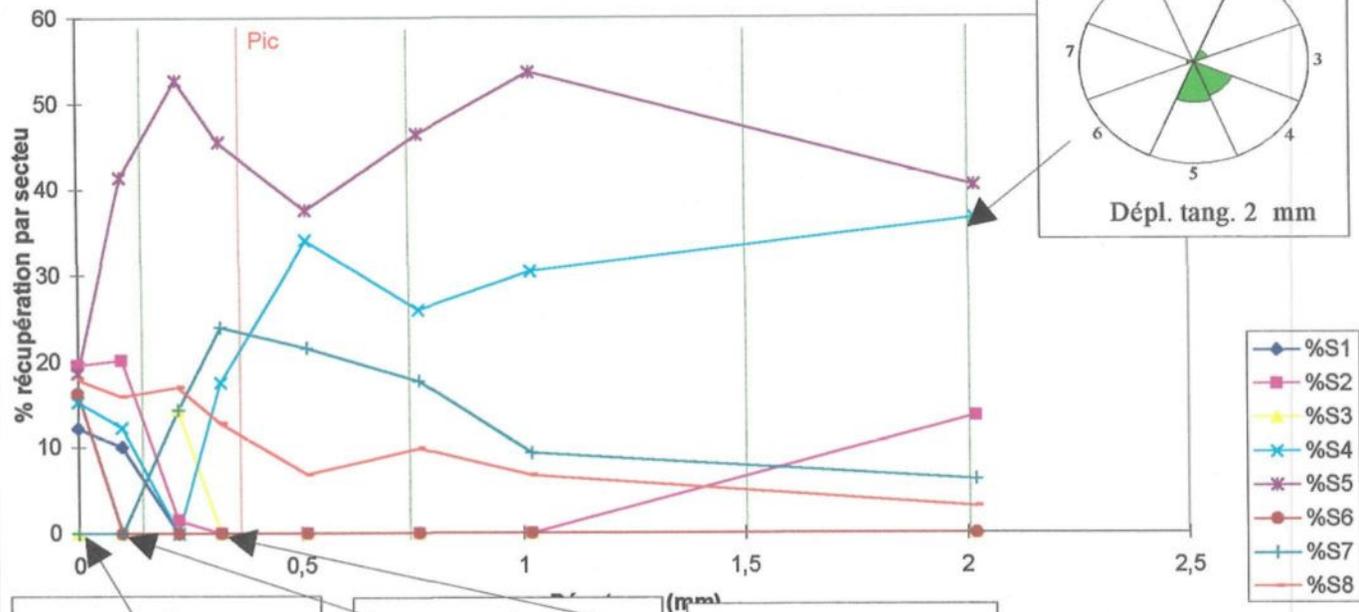
Essai 2: Évolution de la récupération par secteur (4 l/h)



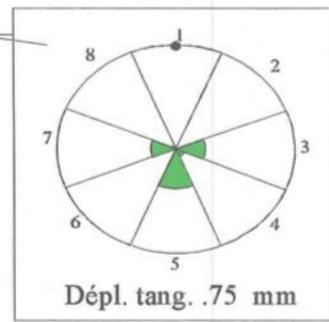
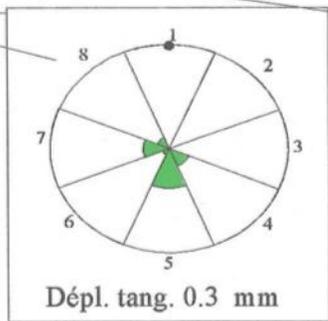
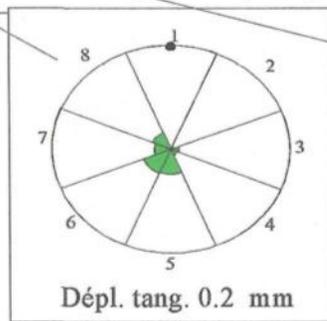
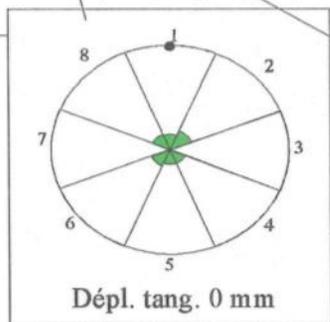
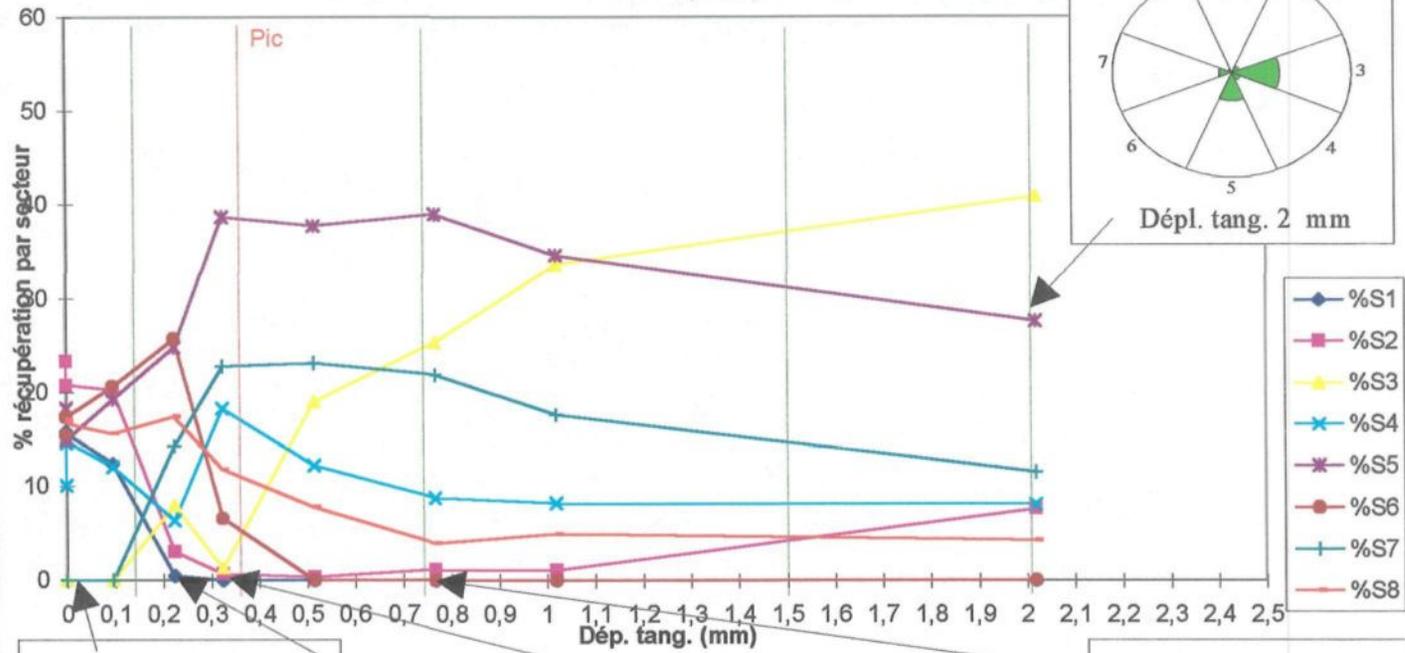
Essai 2: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)



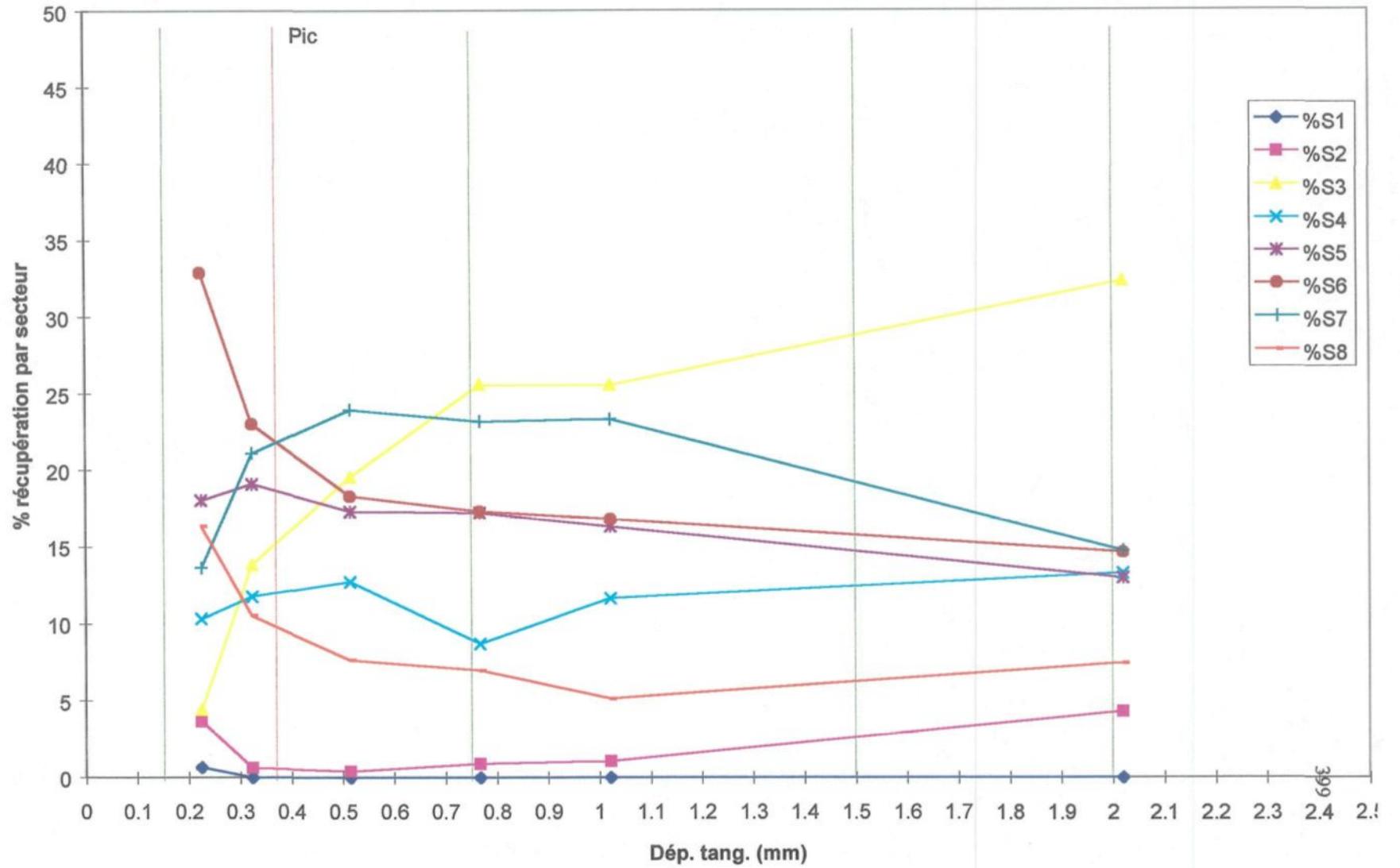
**Essai 9: Évolution de la récupération par secteur
(250 cm³/h)**



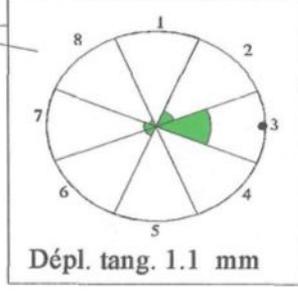
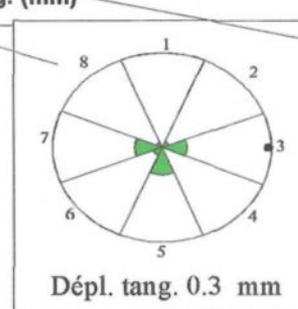
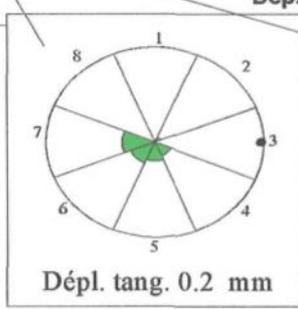
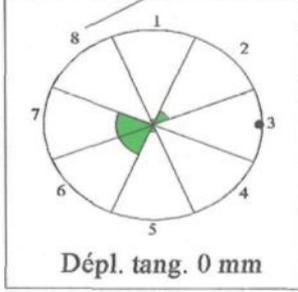
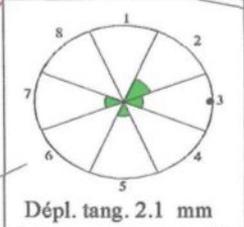
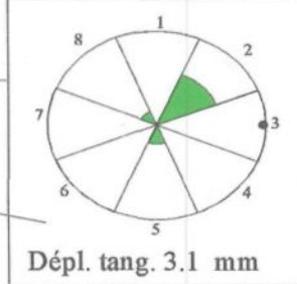
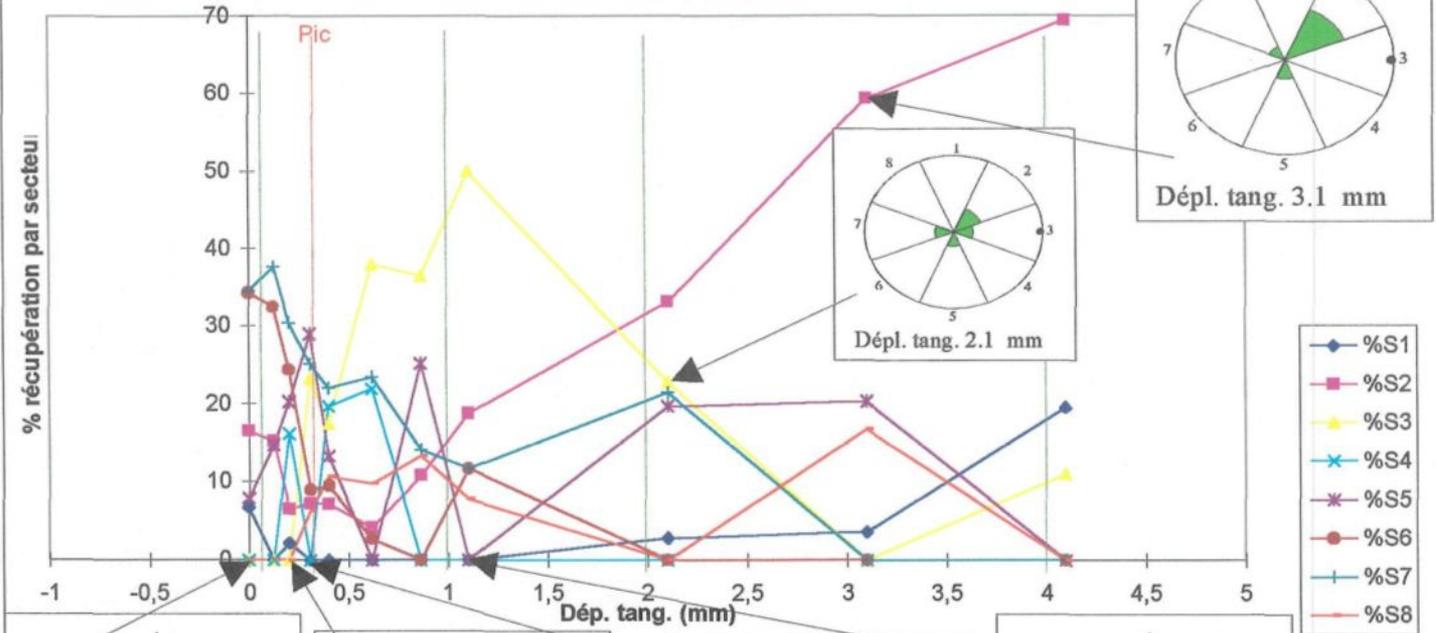
Essai 9: Évolution de la récupération par secteur (1 l/h)



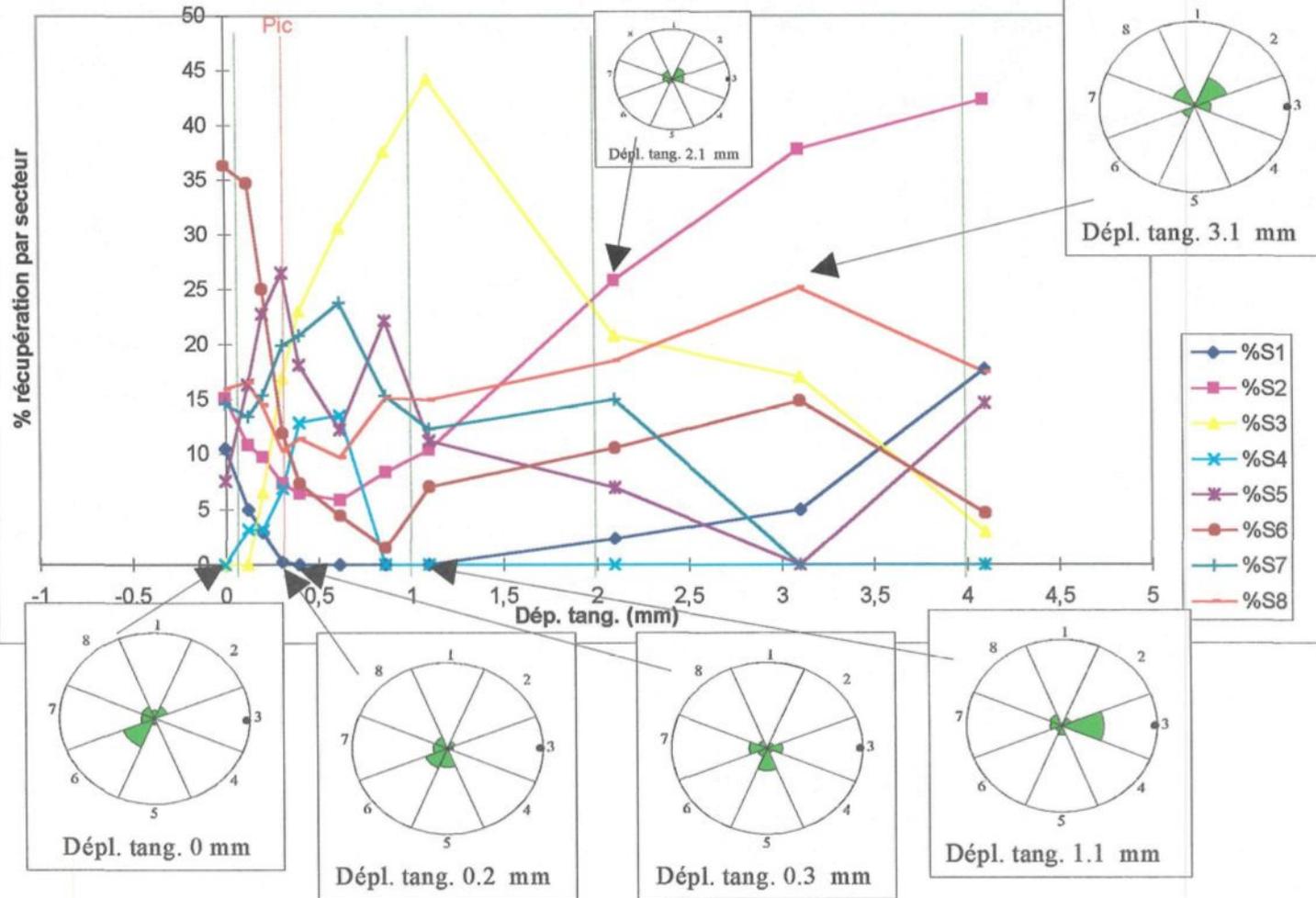
Essai 9: Évolution de la récupération par secteur (4 l/h)



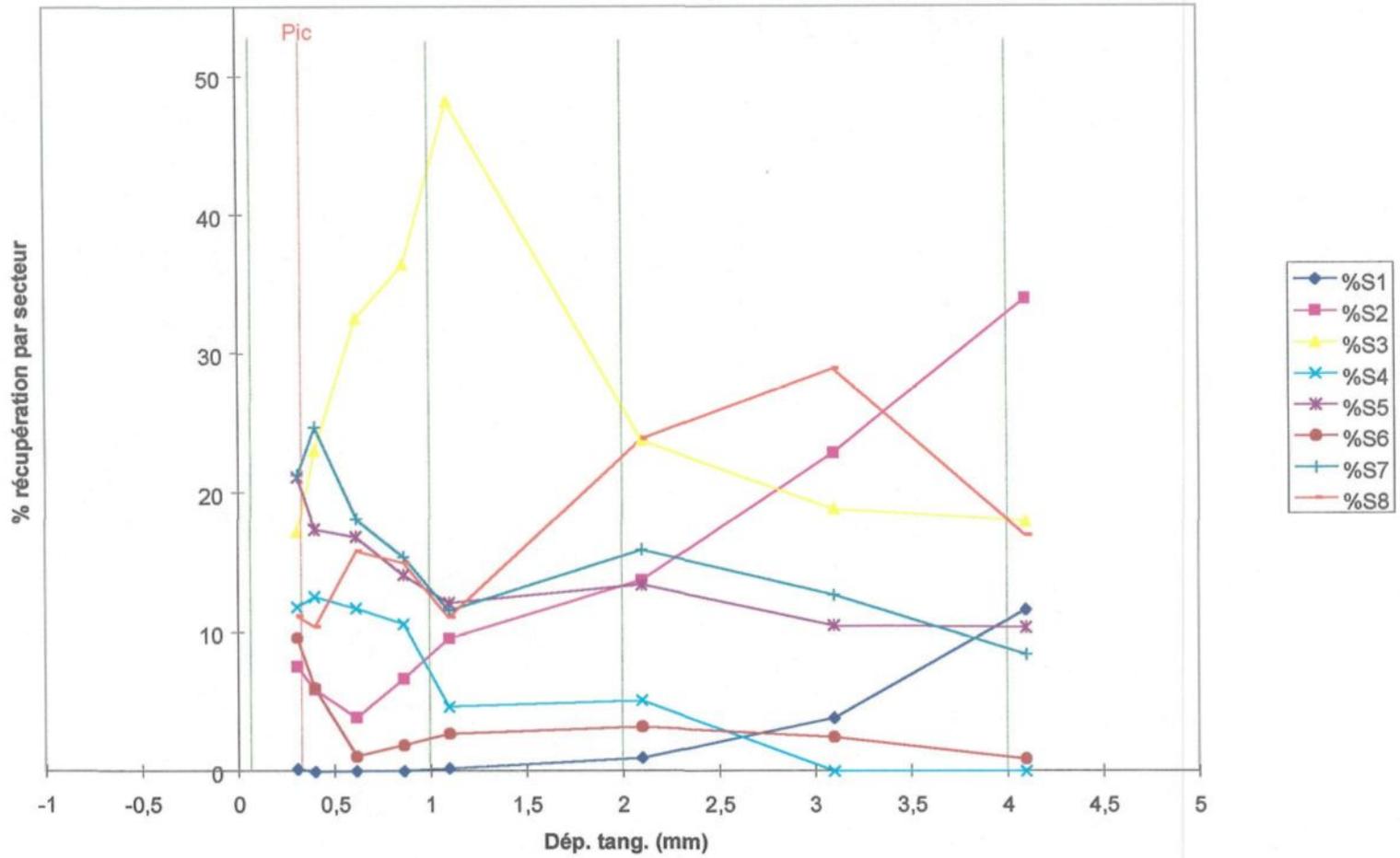
Essai 4: Évolution de la récupération par secteur (250 cm³/h)



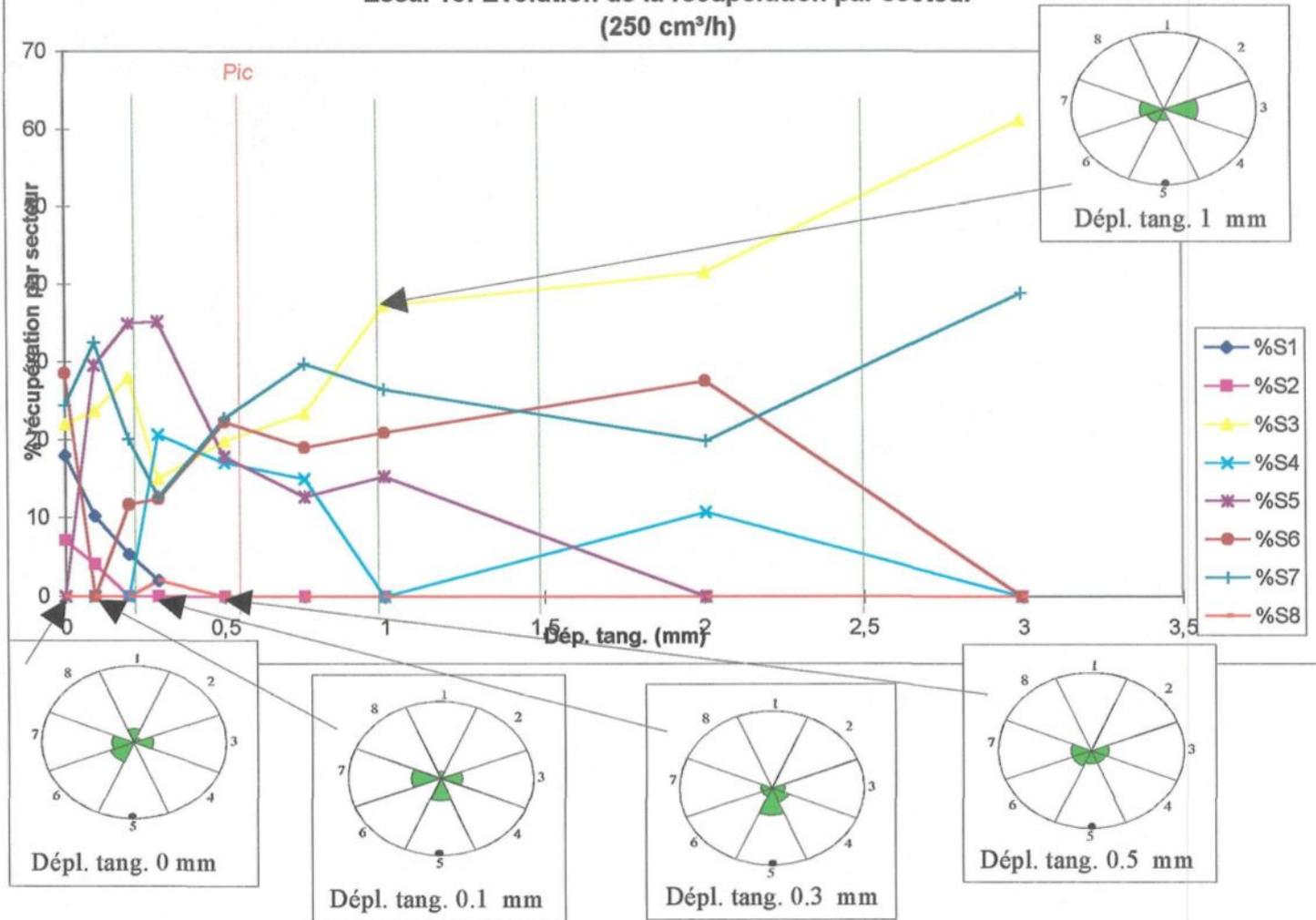
Essai 4: Évolution de la récupération par secteur (1 l/h)



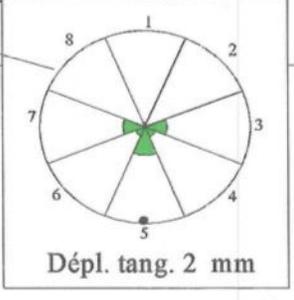
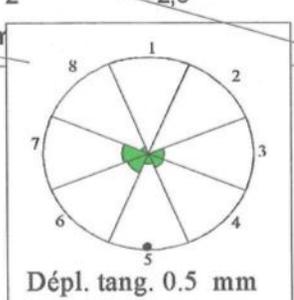
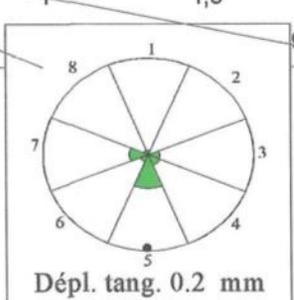
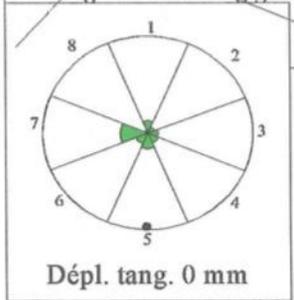
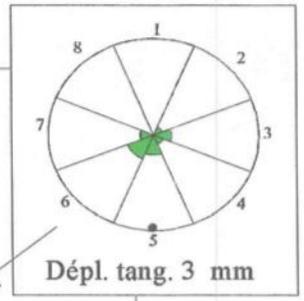
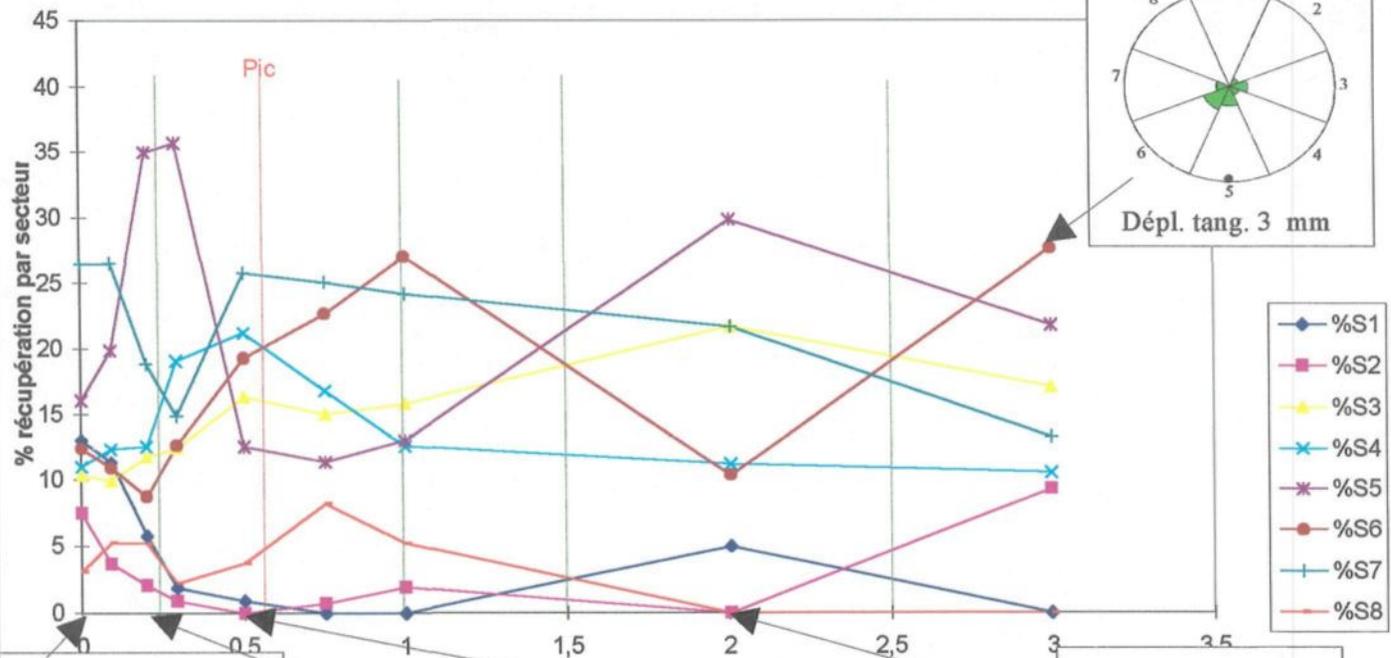
Essai 4: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)



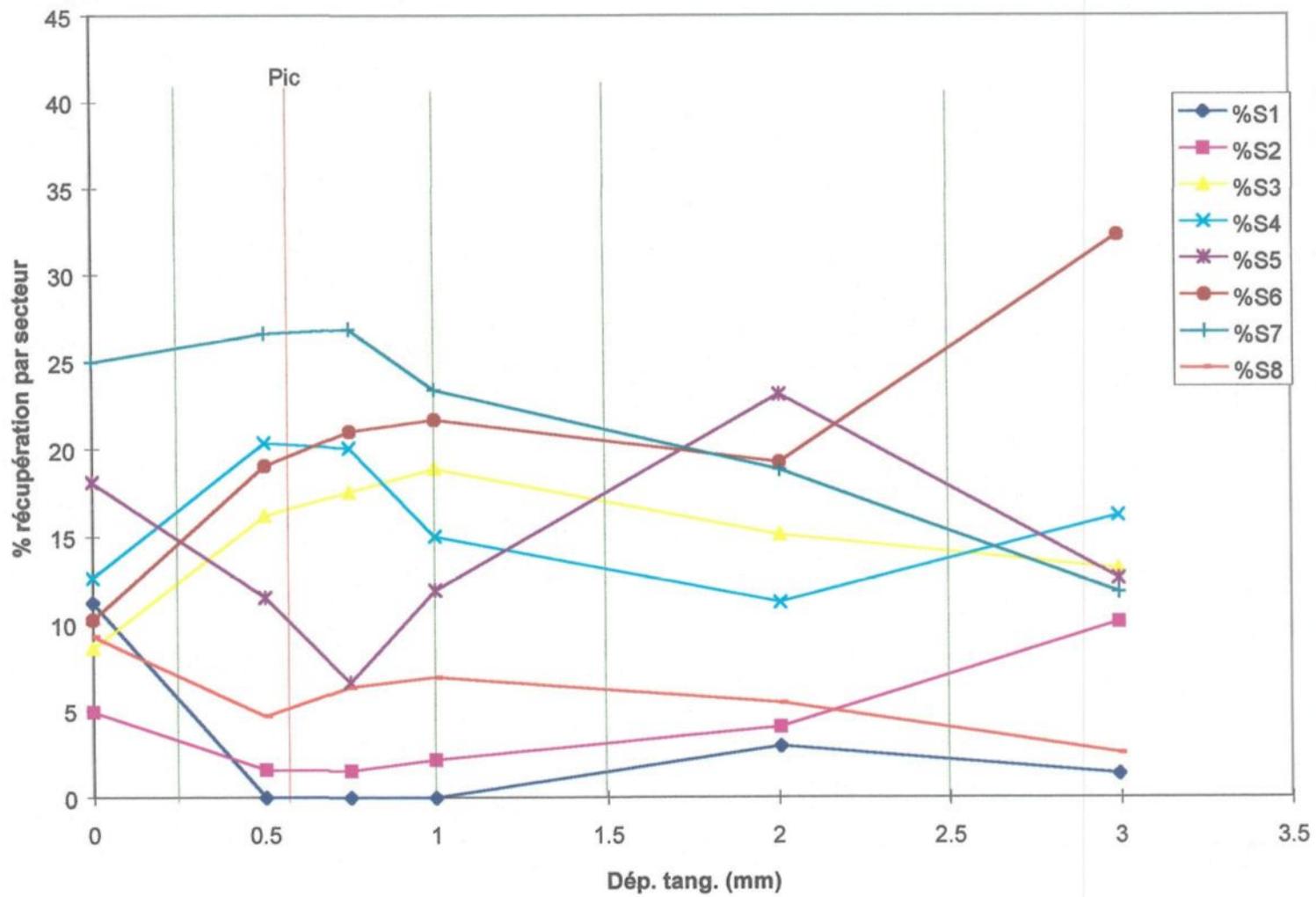
Essai 18: Évolution de la récupération par secteur
(250 cm³/h)



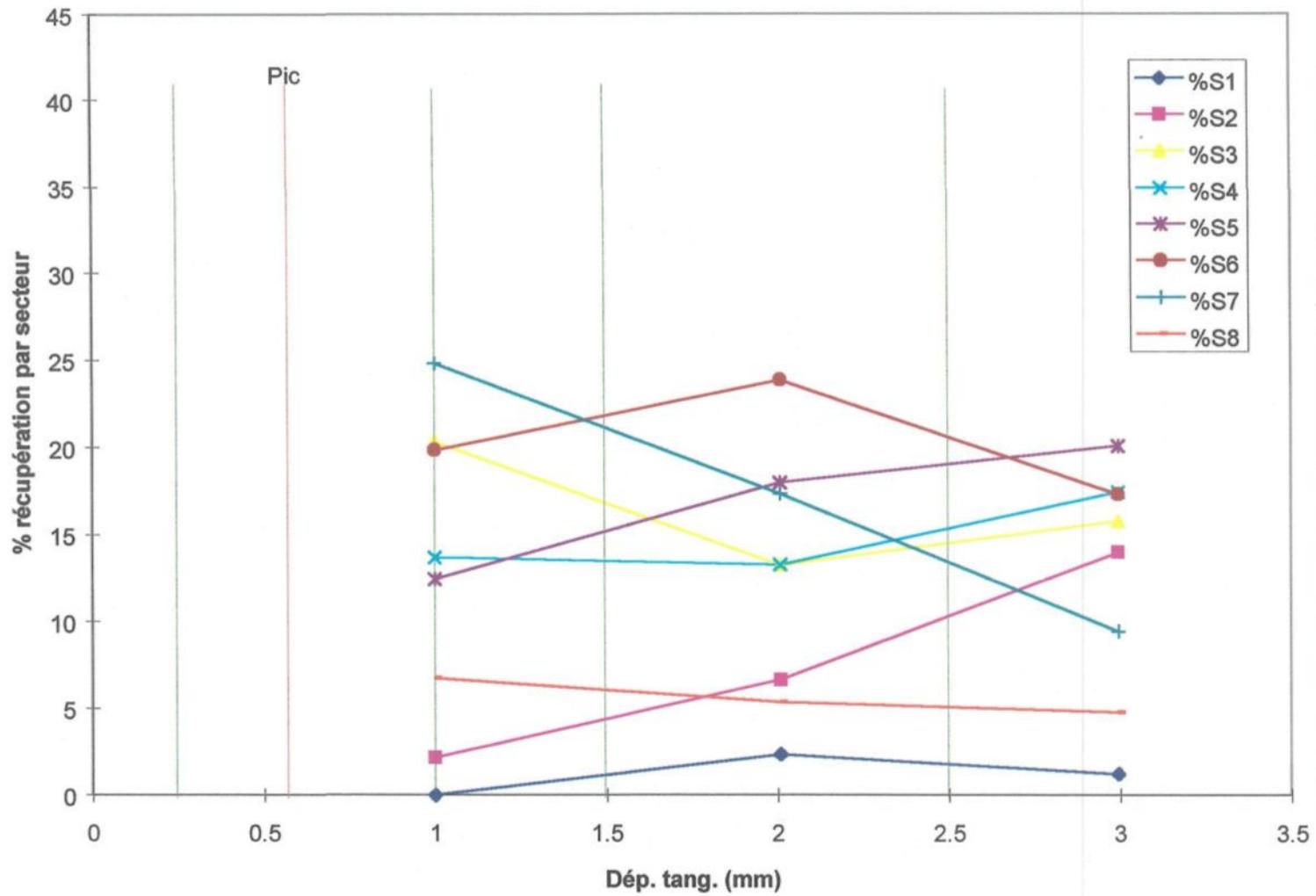
Essai 18: Évolution de la récupération par secteur (1 l/h)



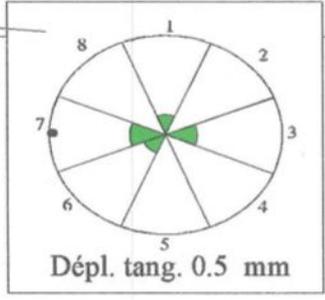
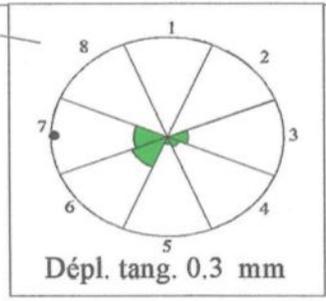
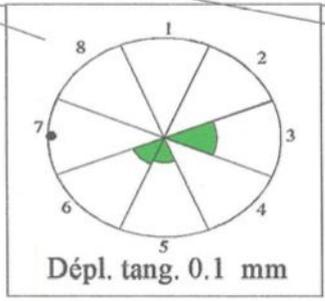
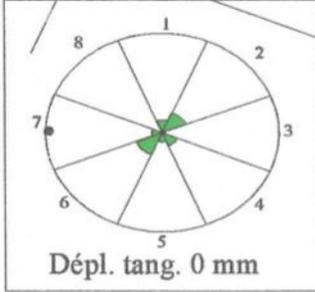
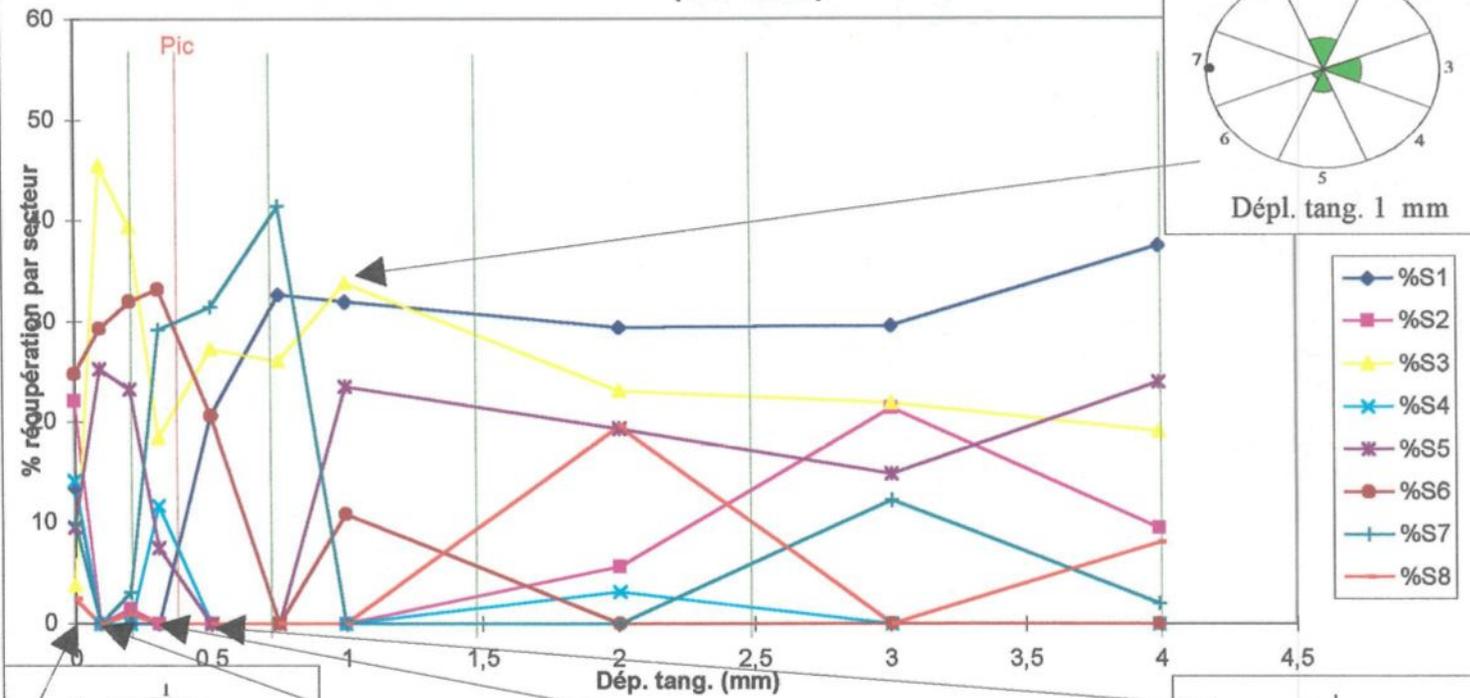
Essai 18: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)



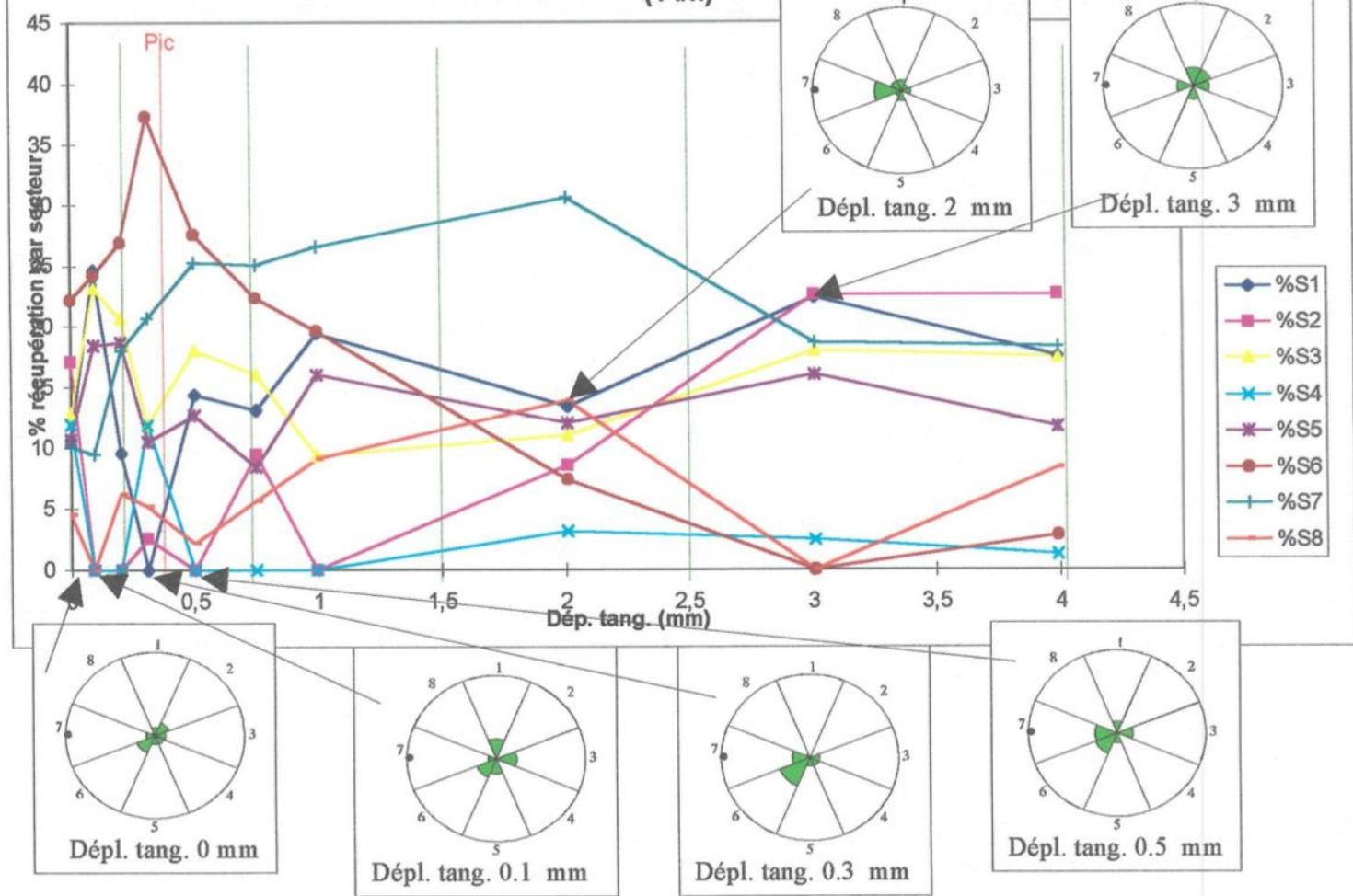
Essai 18: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)



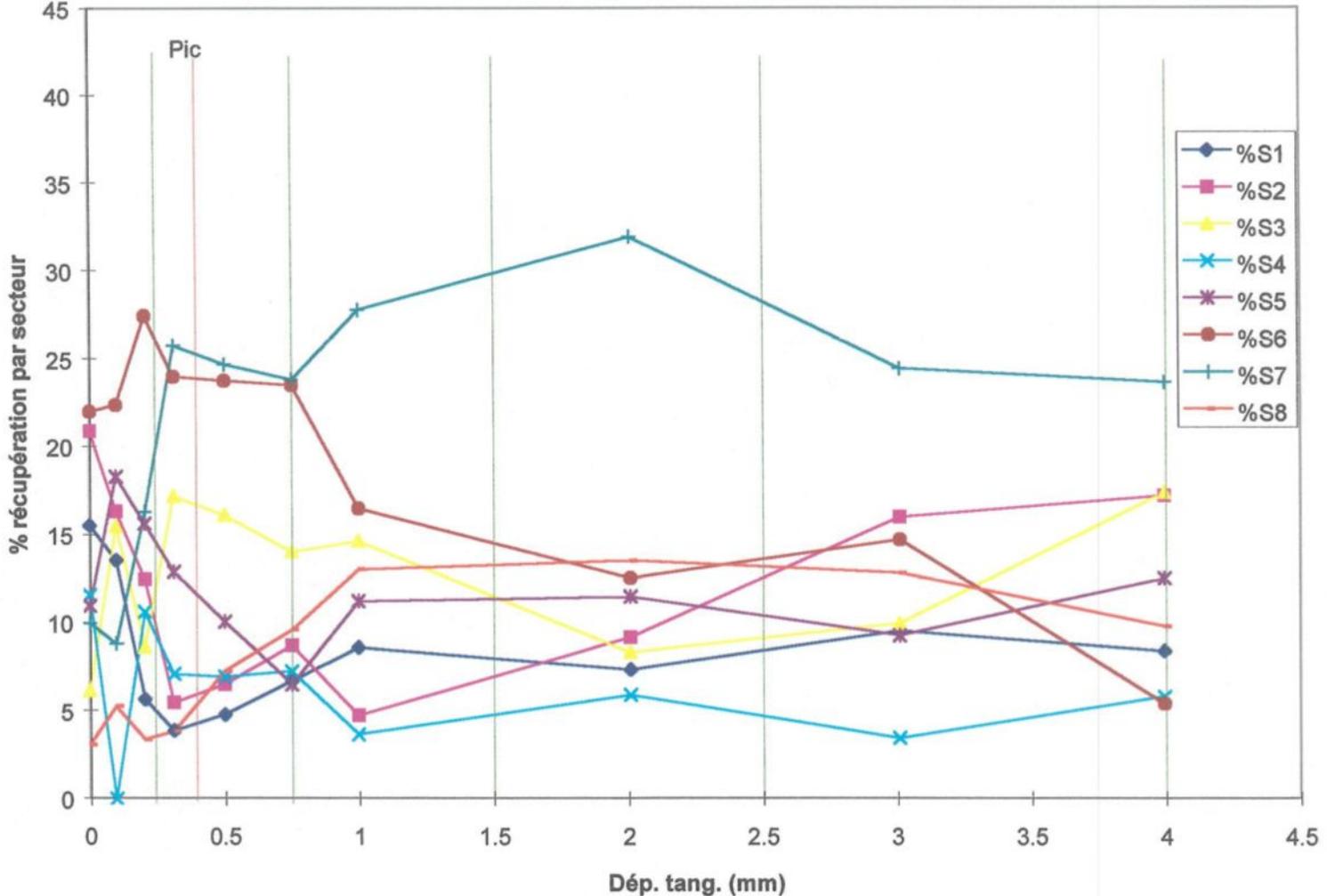
Essai 20: Évolution de la récupération par secteur
(250 cm³/h)



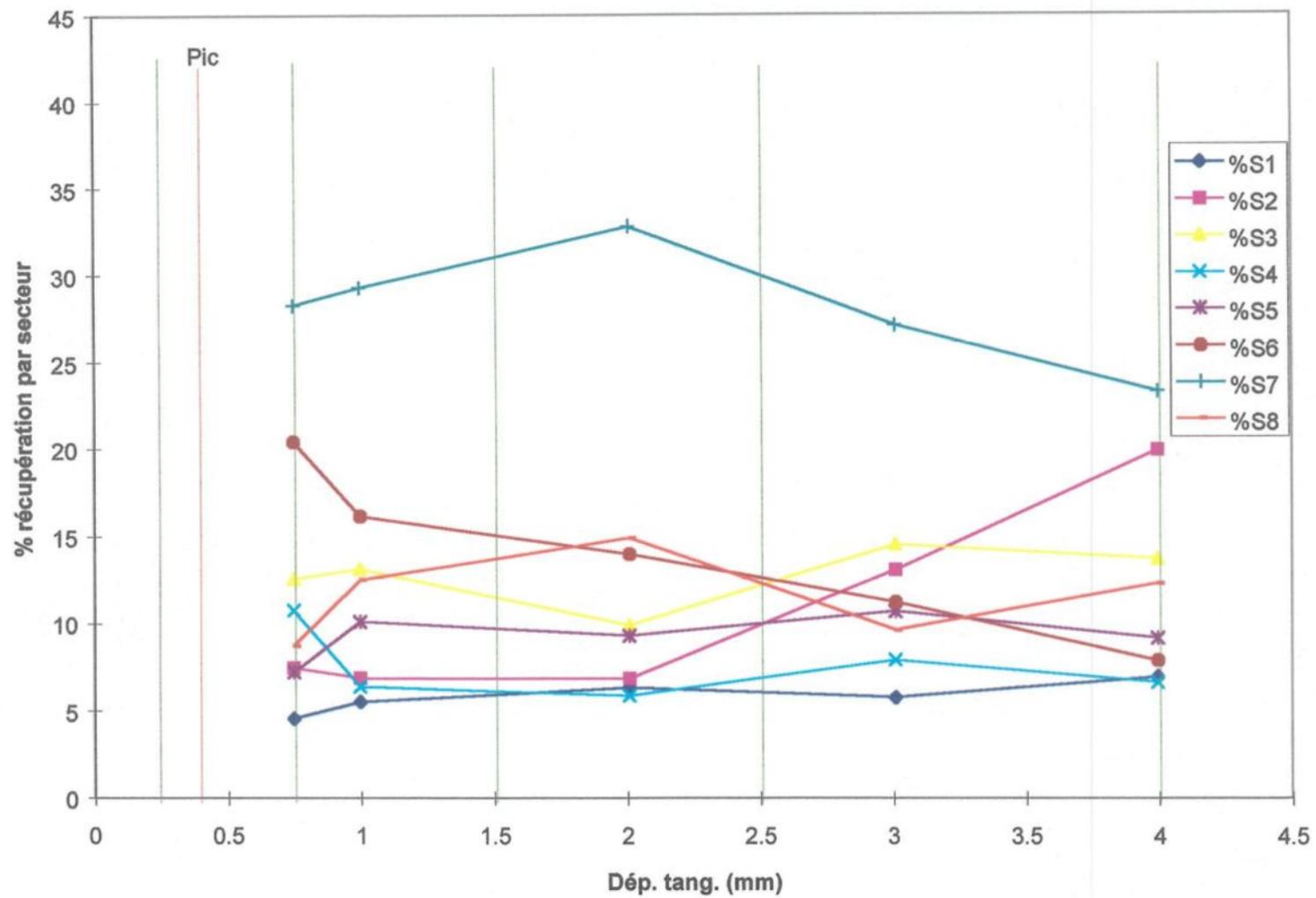
Essai 20: Évolution de la récupération par secteur
(1 l/h)



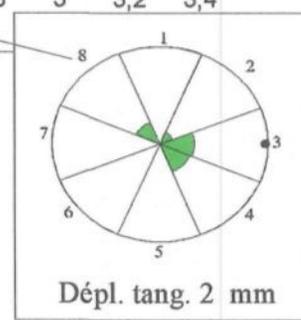
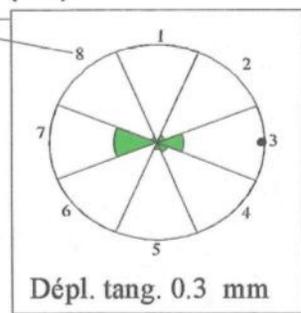
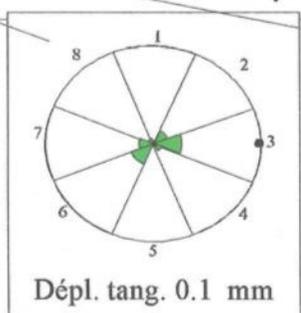
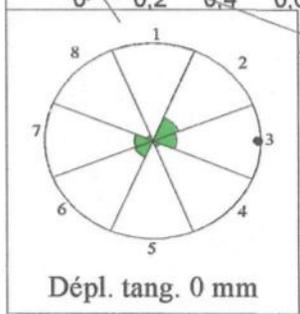
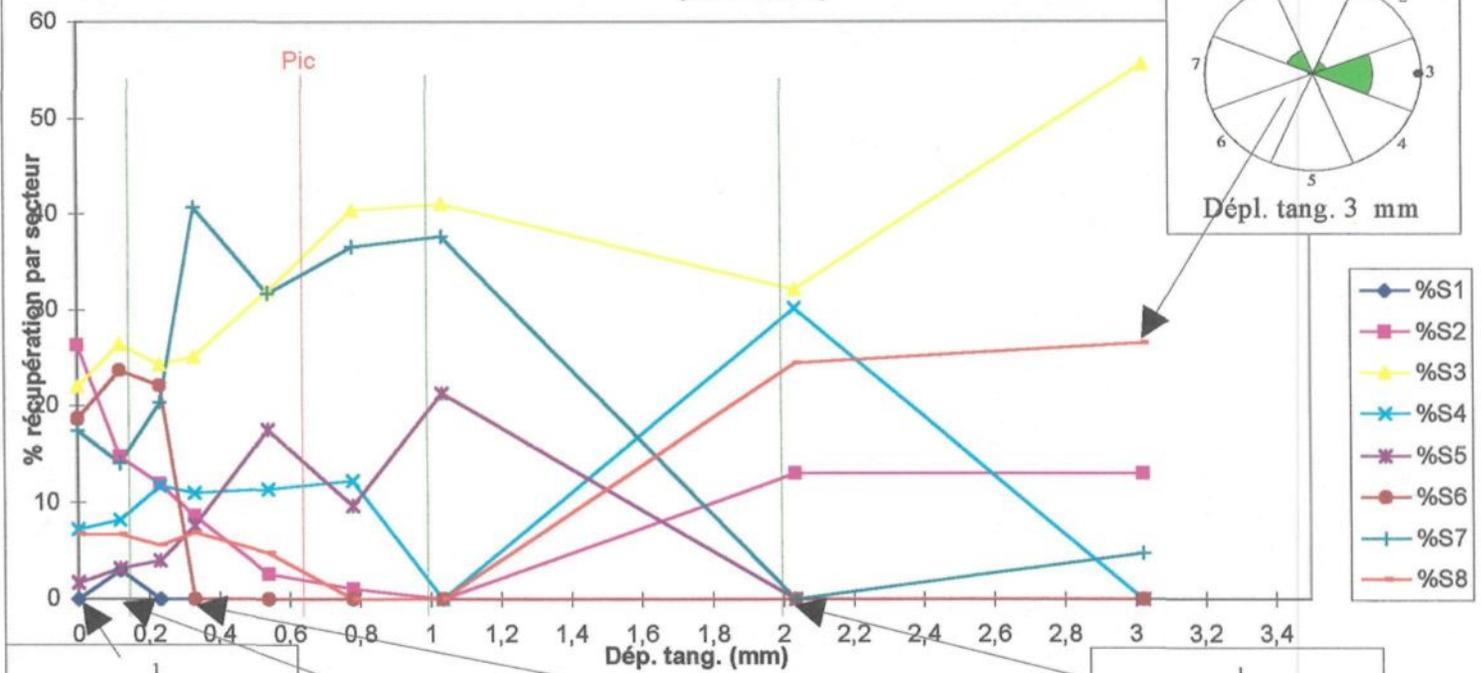
**Essai 20: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)**



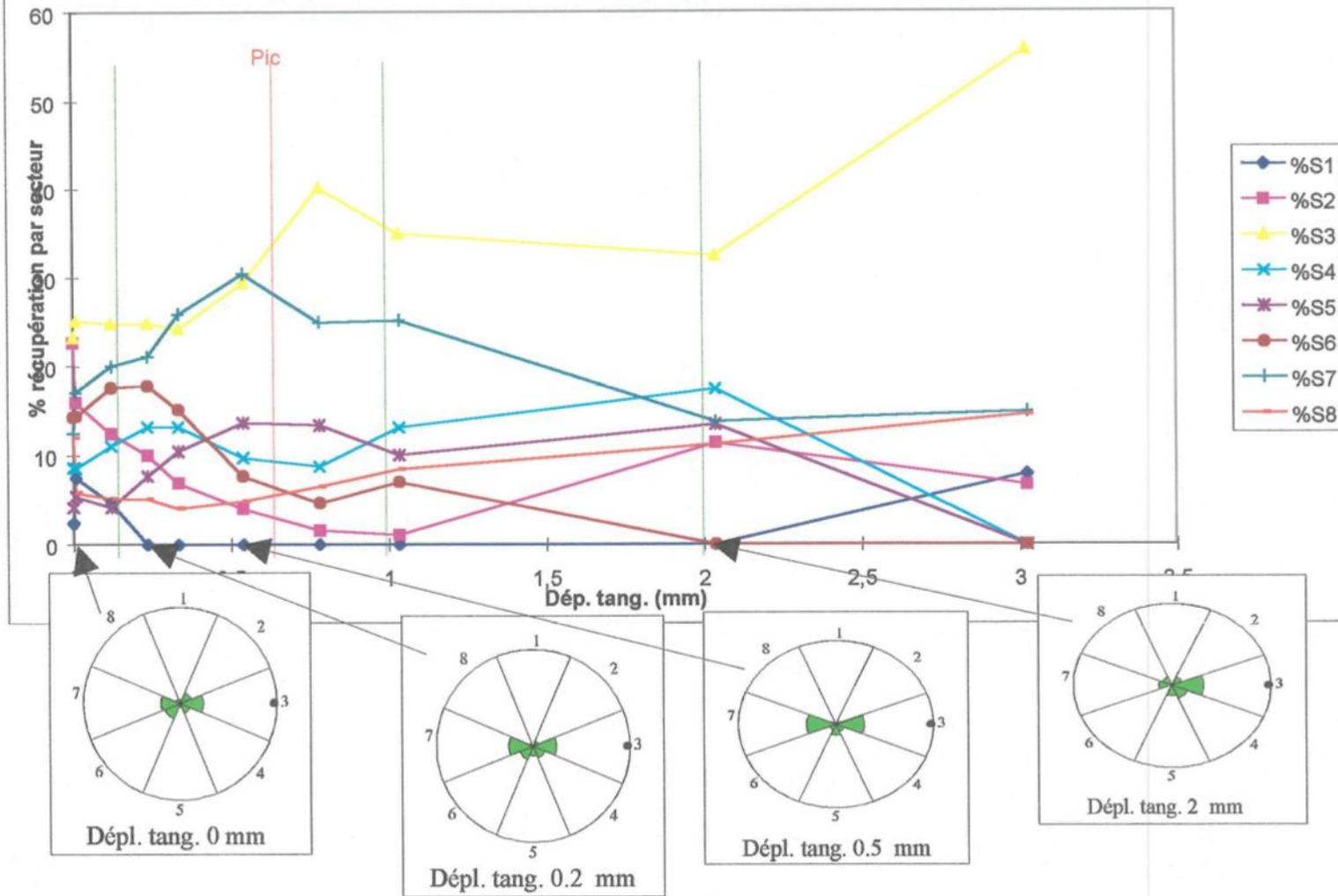
Essai 20: Évolution de la récupération par secteur
(8 l/h)



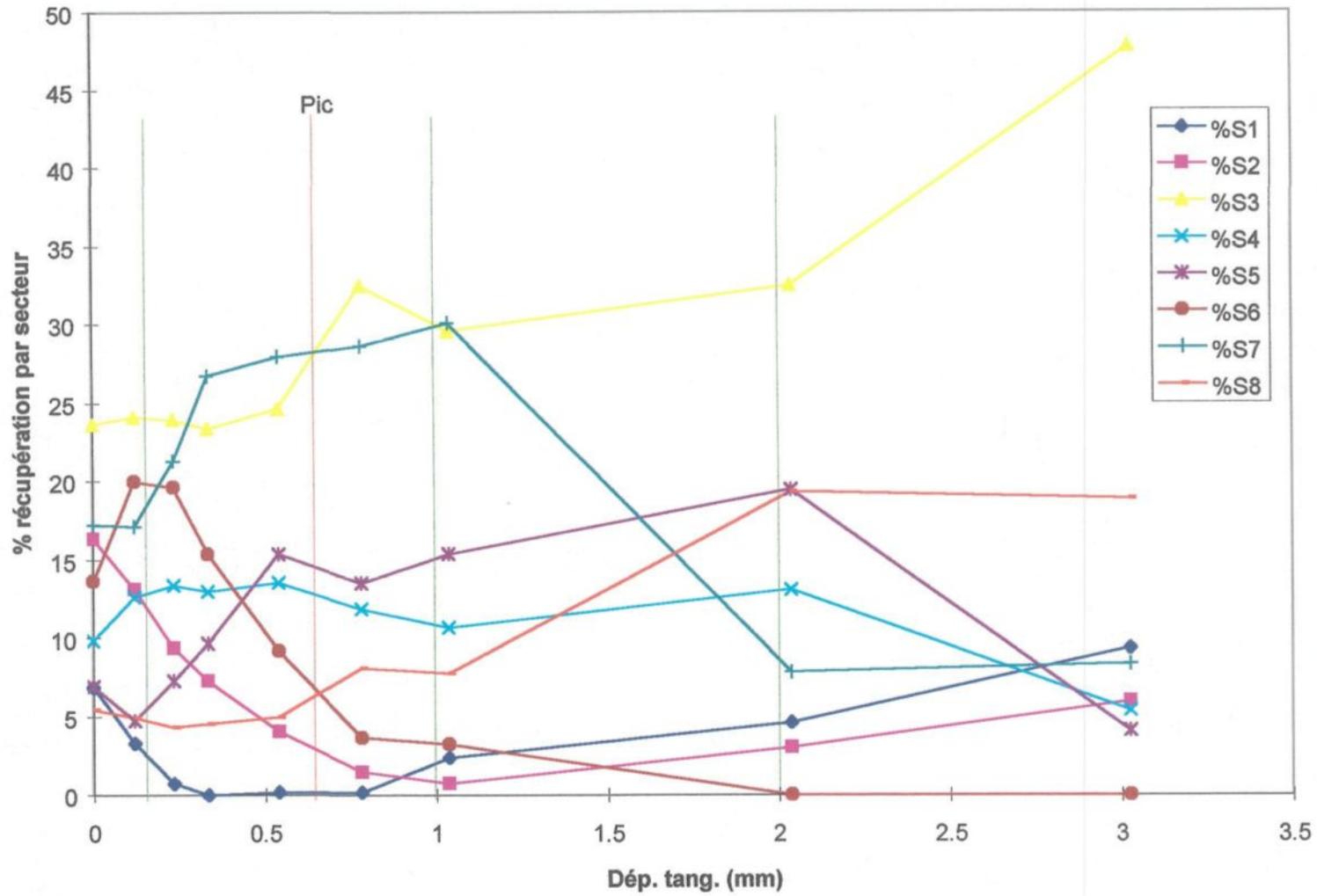
Essai 17: Évolution de la récupération par secteur
(250 cm³/h)

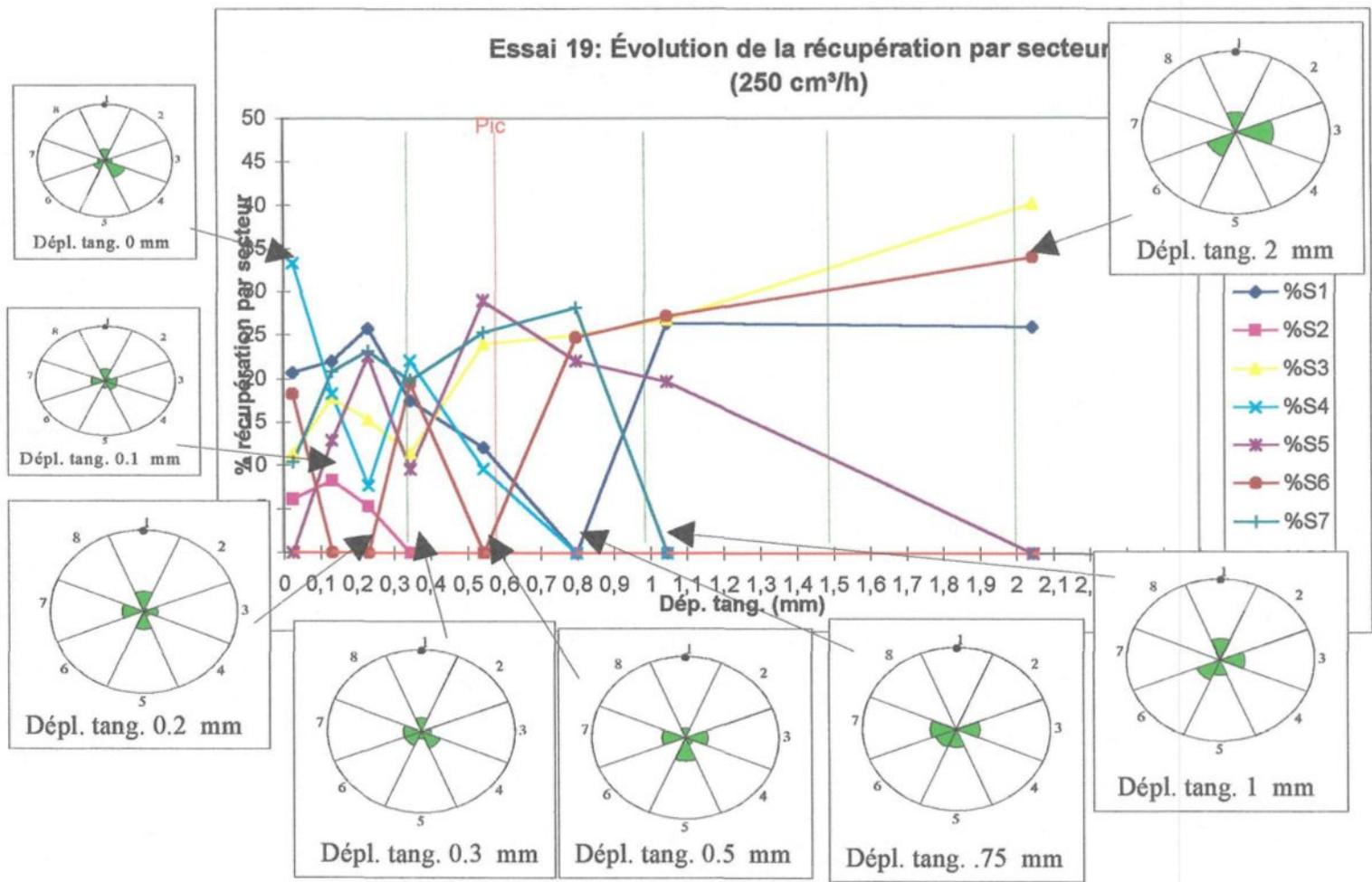


Essai 17: Évolution de la récupération par secteur
(1 l/h)

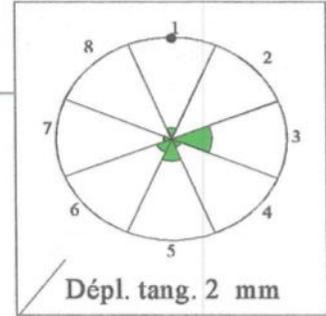
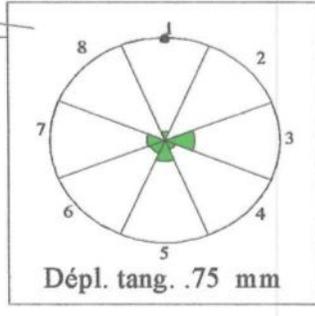
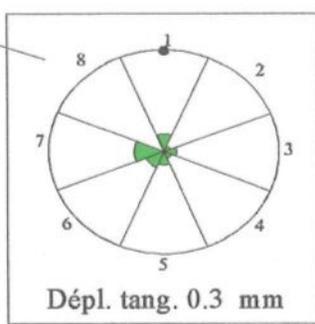
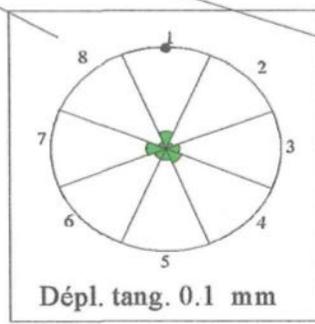
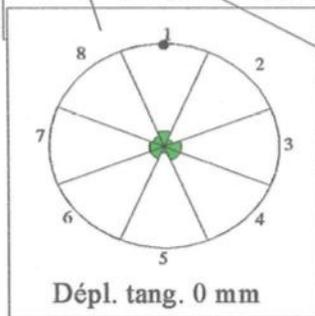
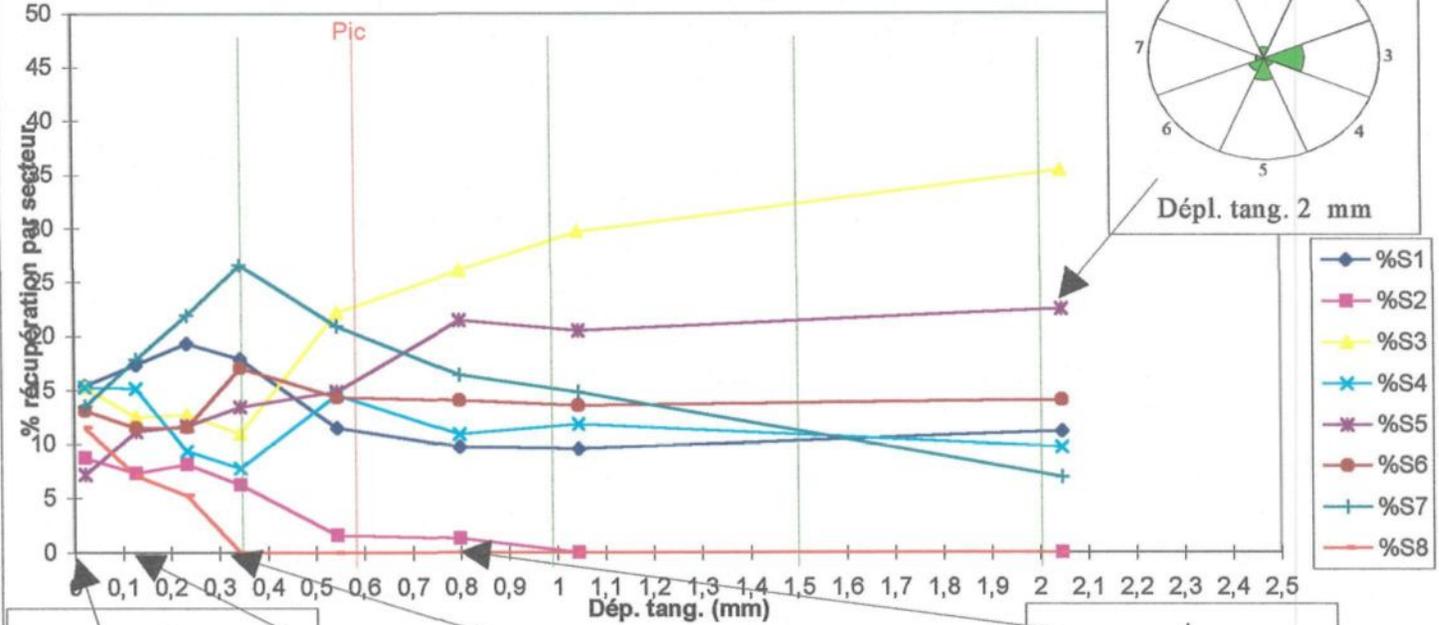


Essai 17: Évolution de la récupération par secteur
(4 l/h)

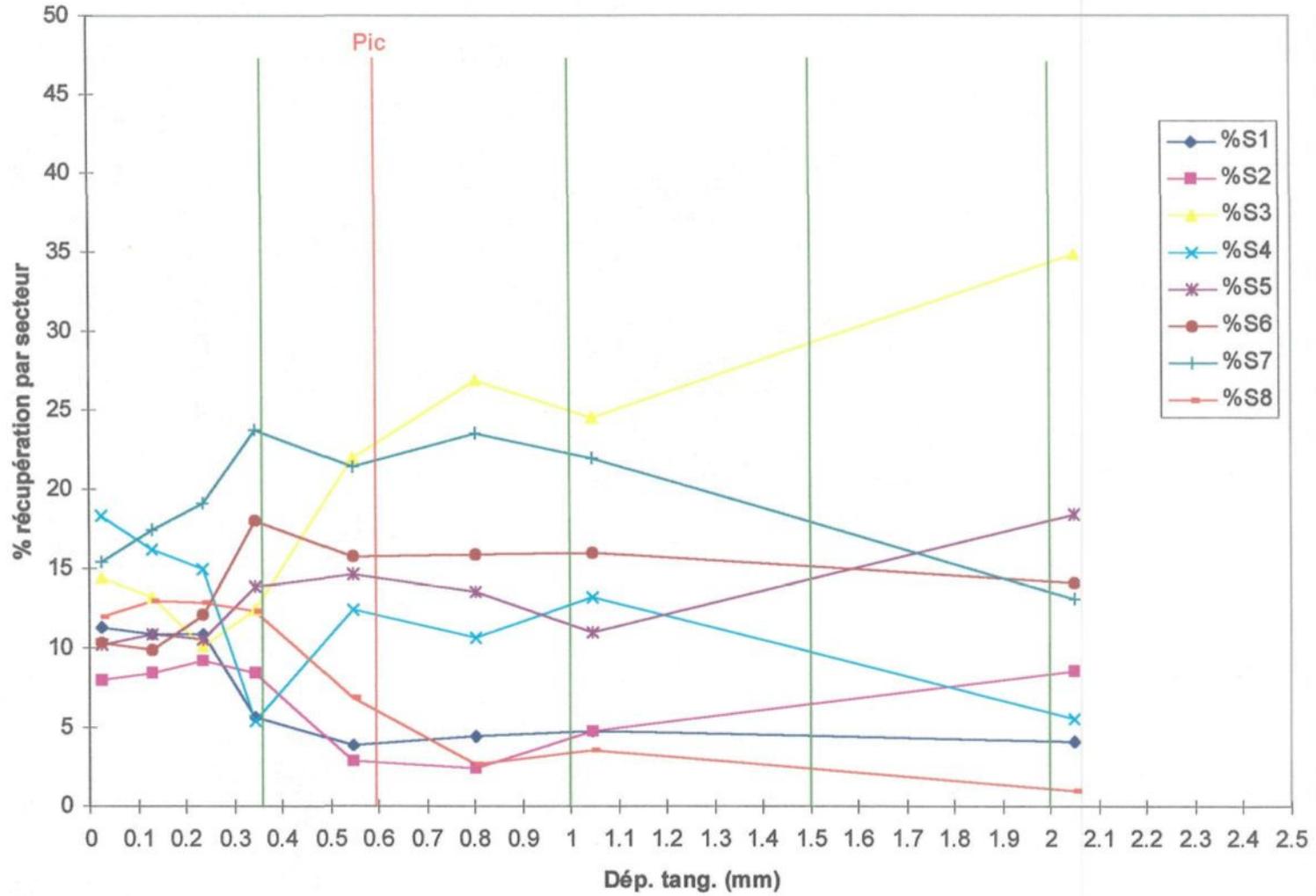




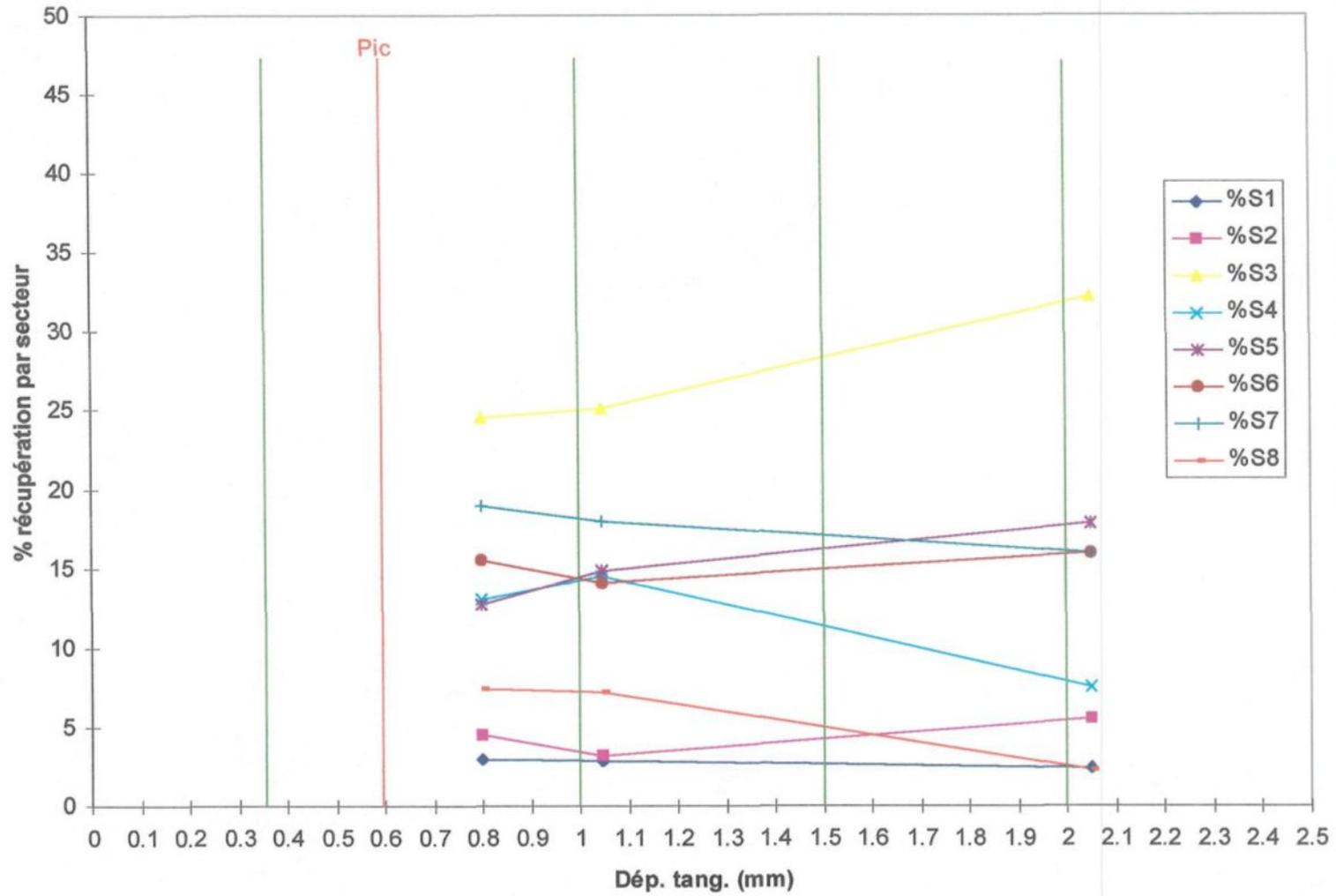
Essai 19: Évolution de la récupération par secteur (1 l/h)



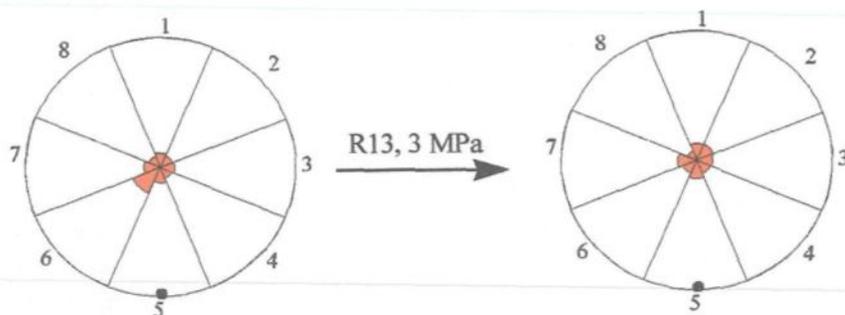
Essai 19: Évolution de la récupération par secteur (4 l/h)



Essai 19: Évolution de la récupération par secteur (8 l/h)

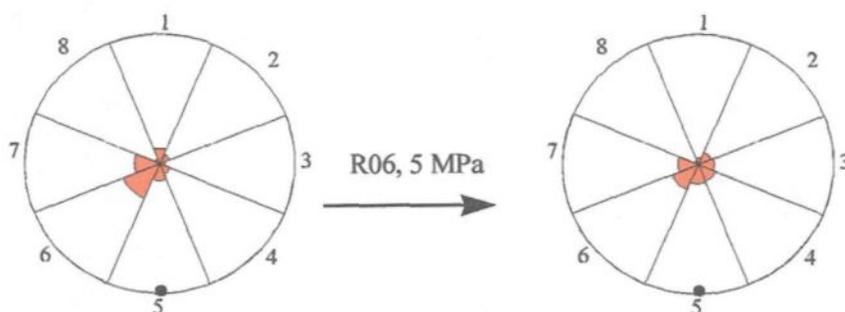


Direction 000, Injection 4 l/h



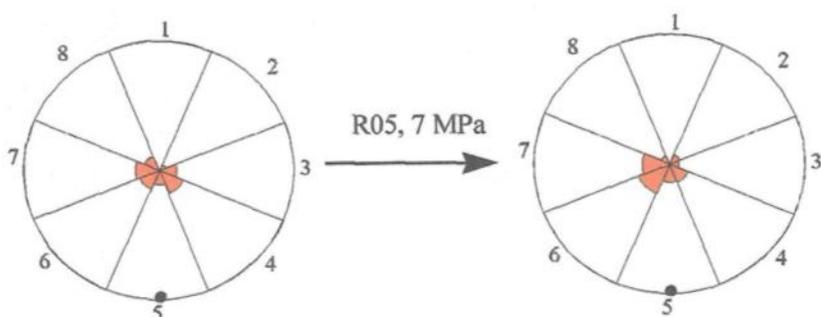
Dépl. tang. 0 mm

Dépl. tang. 2 mm



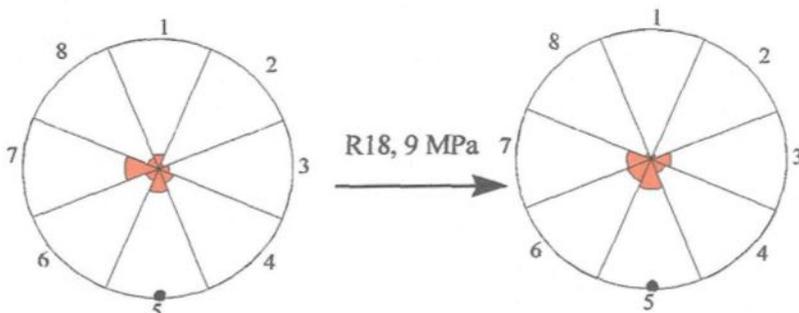
Dépl. tang. 0 mm

Dépl. tang. 2 mm



Dépl. tang. 0.2 mm

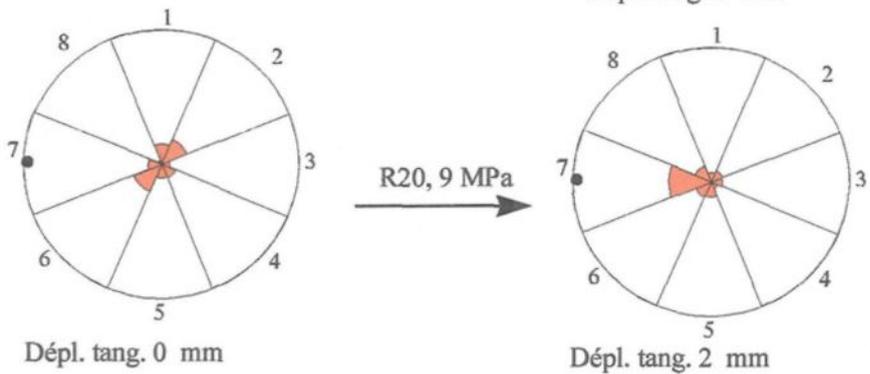
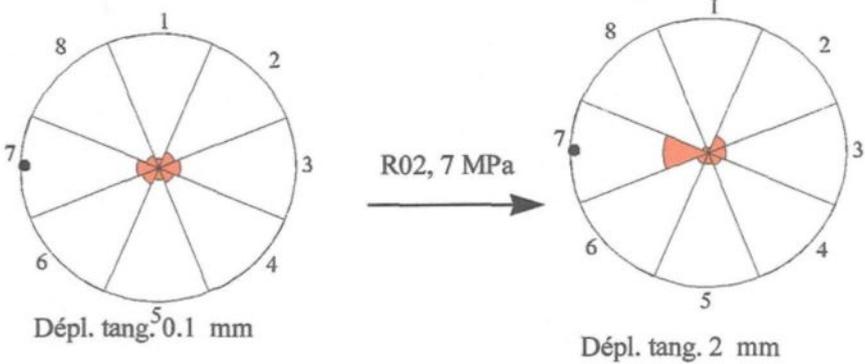
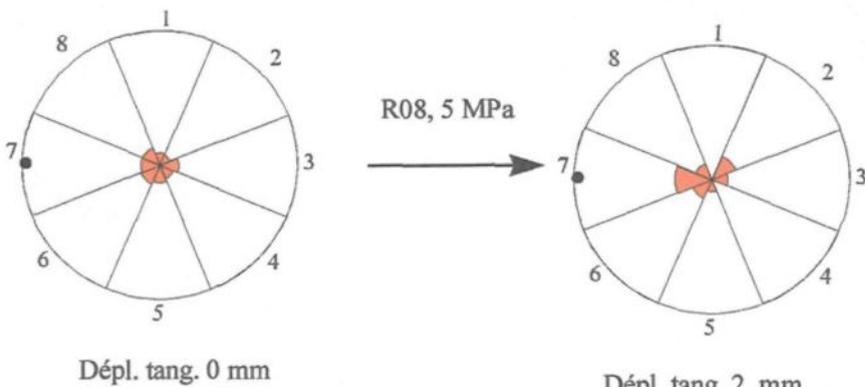
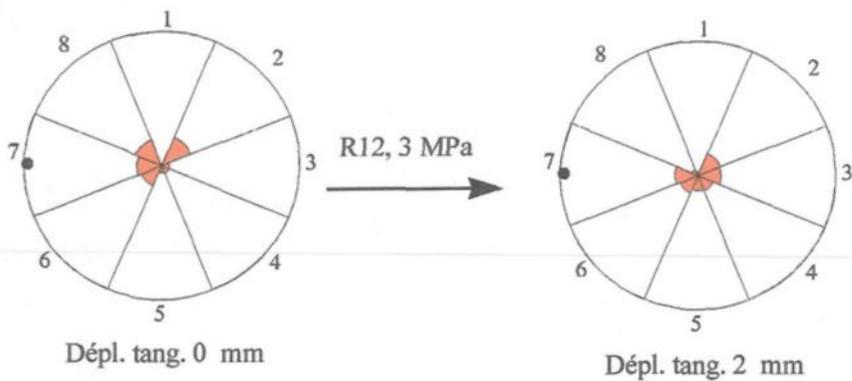
Dépl. tang. 2 mm



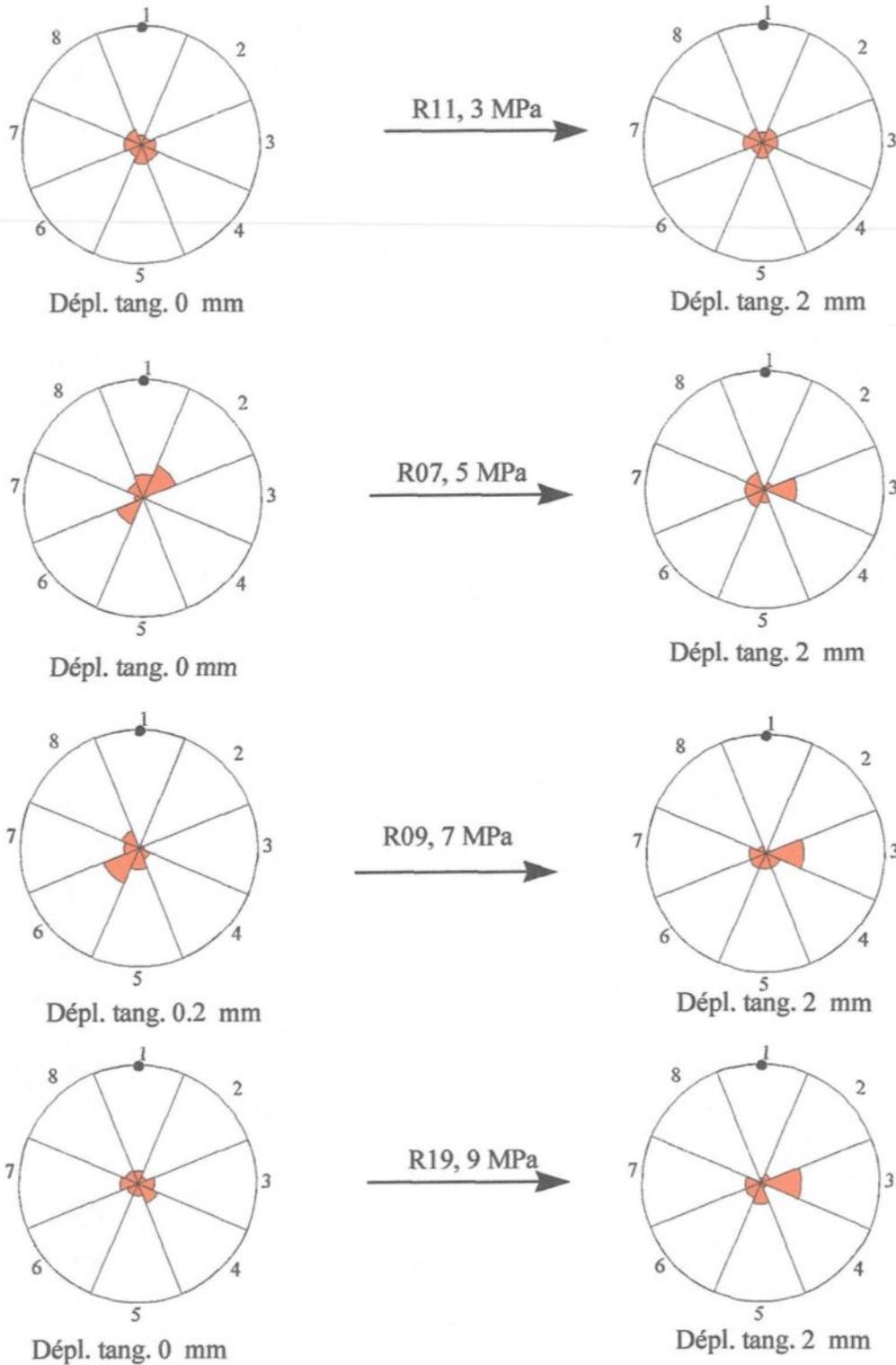
Dépl. tang. 0 mm

Dépl. tang. 2 mm

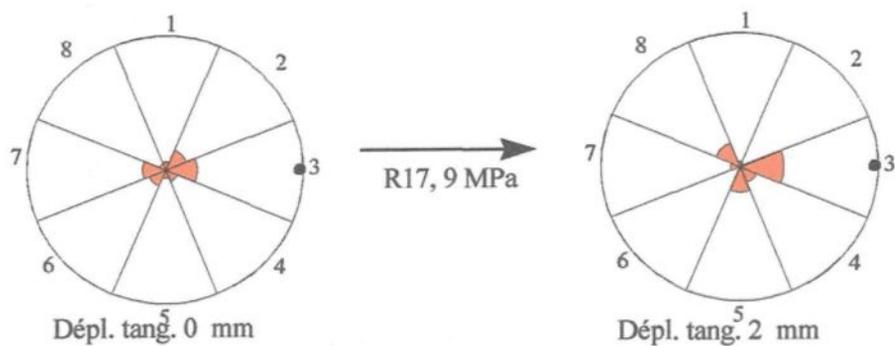
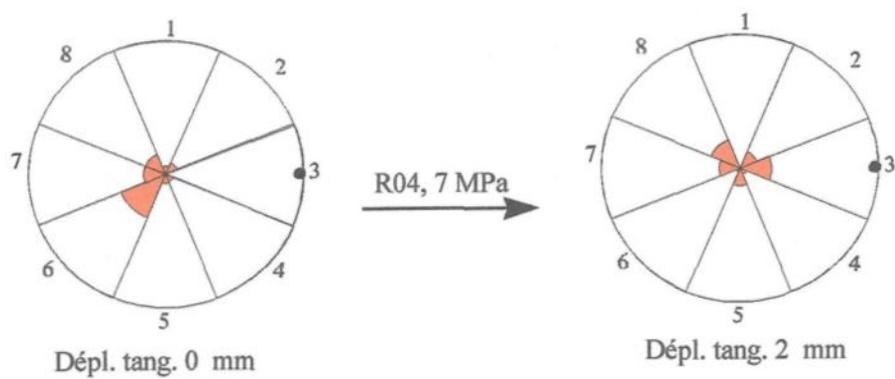
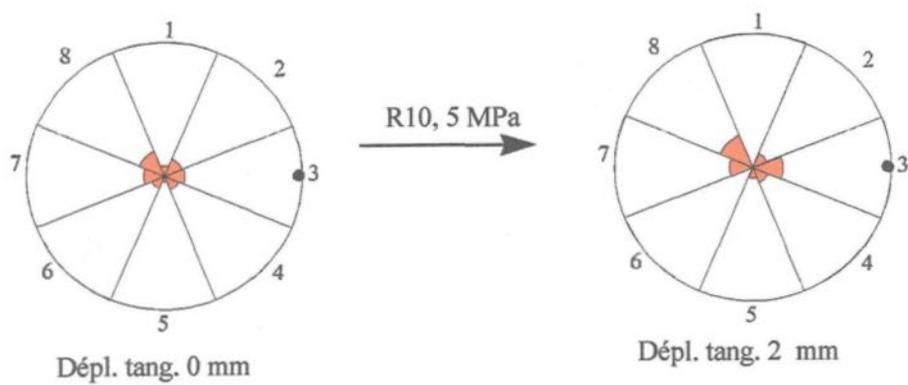
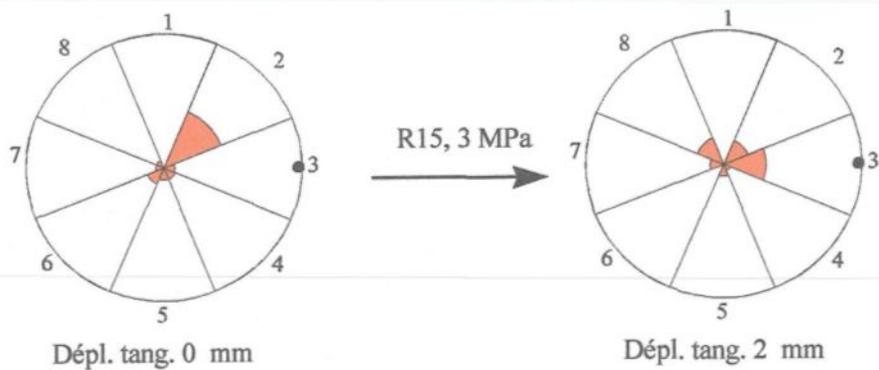
Direction 90, Injection 4 l/h



Direction 180, Injection 4 l/h



Direction 270, Injection 4 l/h



ANNEXE 11
VARIOGRAMMES

ANNEXE 11

VARIOGRAMMES

Légende des figures de l'annexe 11

Les figures de l'annexe 11 sont respectivement présentées par ordre de contrainte normale croissante (3 à 9 MPa), par direction de cisaillement (0 à 270), par direction d'enregistrement des profils au rugosimètre (direction 0, 1 4, 5) et finalement par degré des variogrammes (ordre 0, 1, 2).

Sur les figures, exemple, l'inscription (E07A) correspond à :

E (profil avant cisaillement)
07 (numéro de la réplique)
A (éponge A).

L'inscription (E07B) correspond à :

E (profil avant cisaillement)
07 (numéro de la réplique)
B (éponge B).

L'inscription (M07A) correspond à :

M (profil après cisaillement)
07 (numéro de la réplique)
A (éponge A).

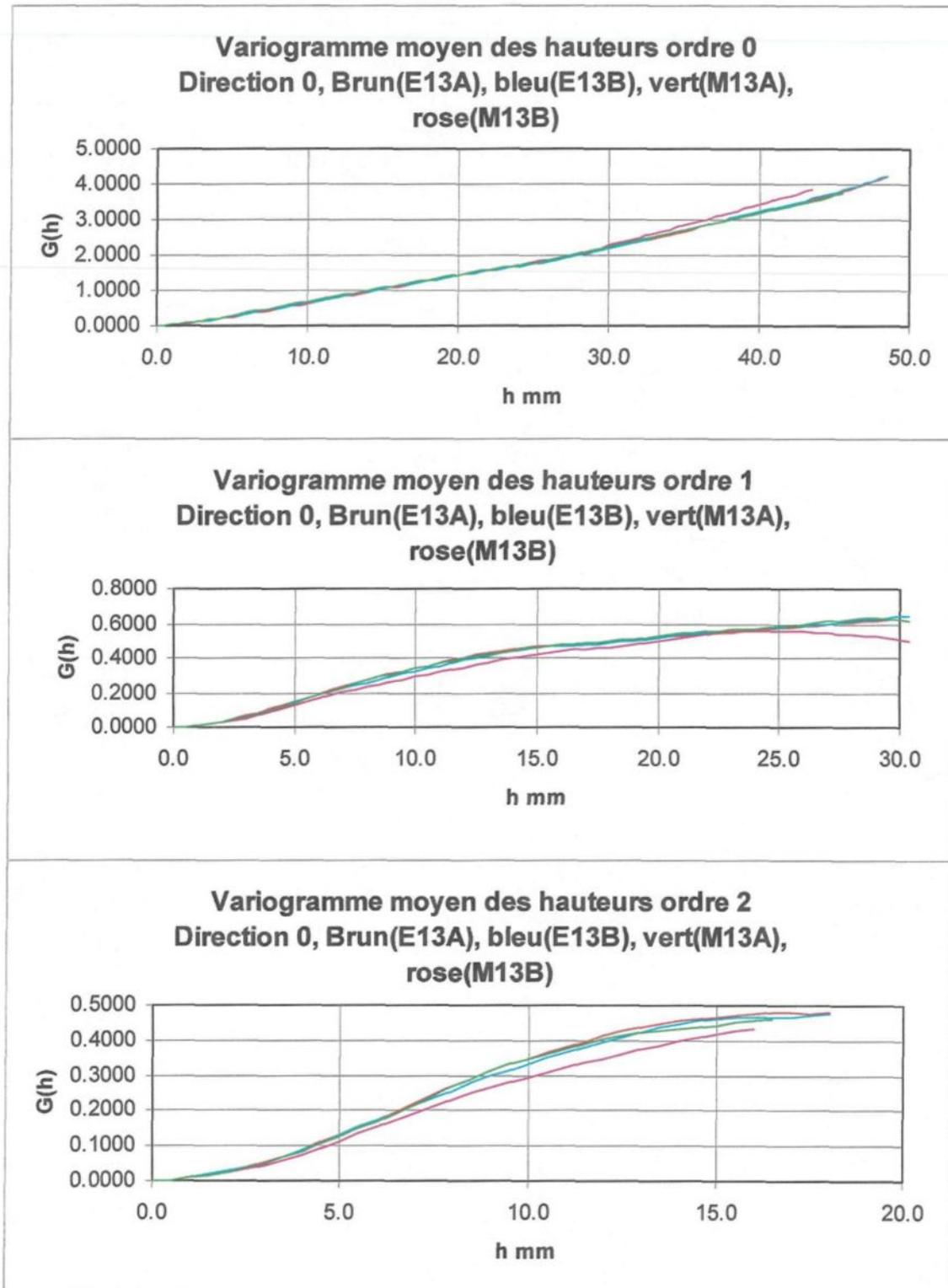
L'inscription (M07B) correspond à :

M (profil après cisaillement)

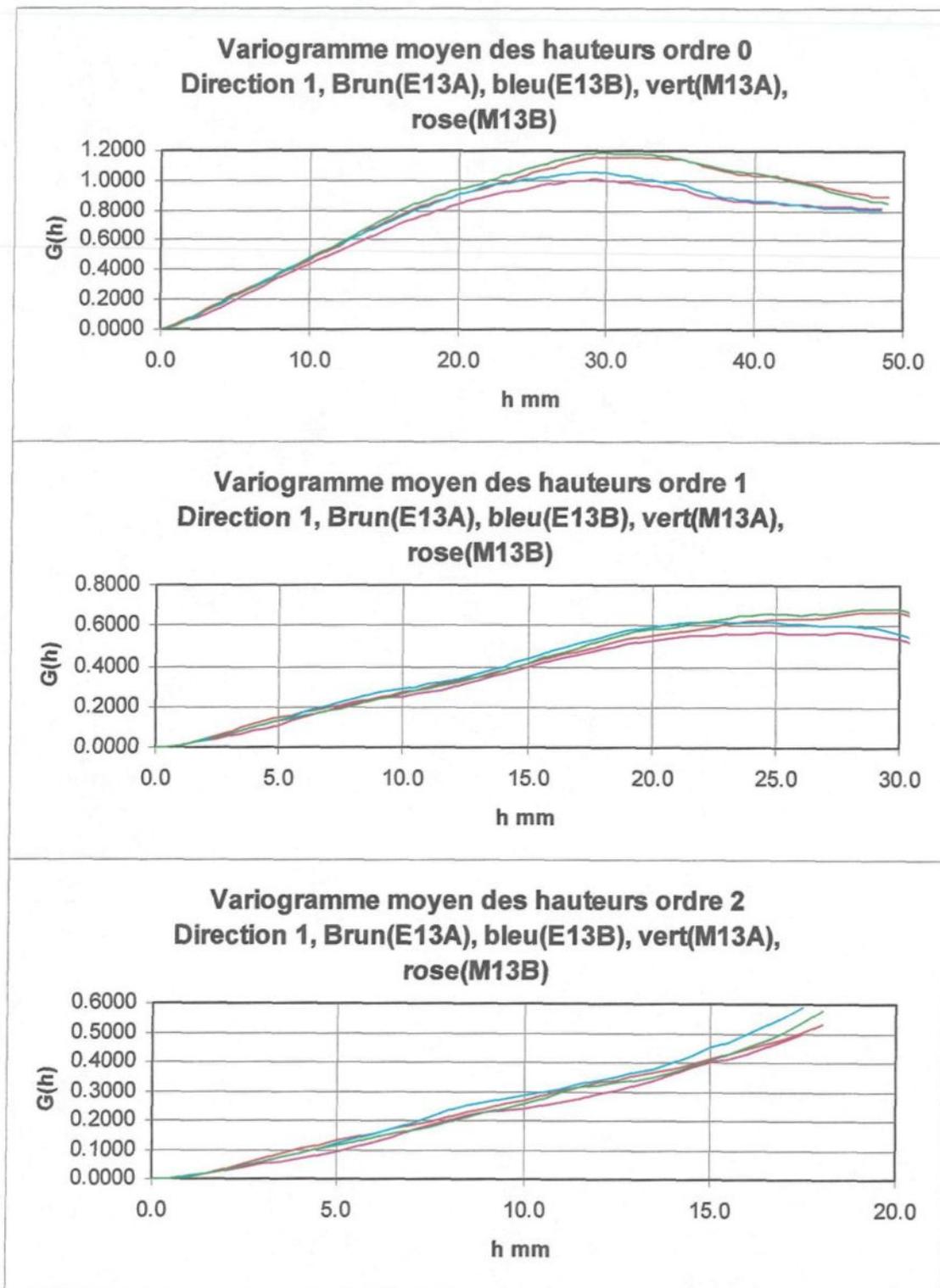
07 (numéro de la réplique)

B (éponge B).

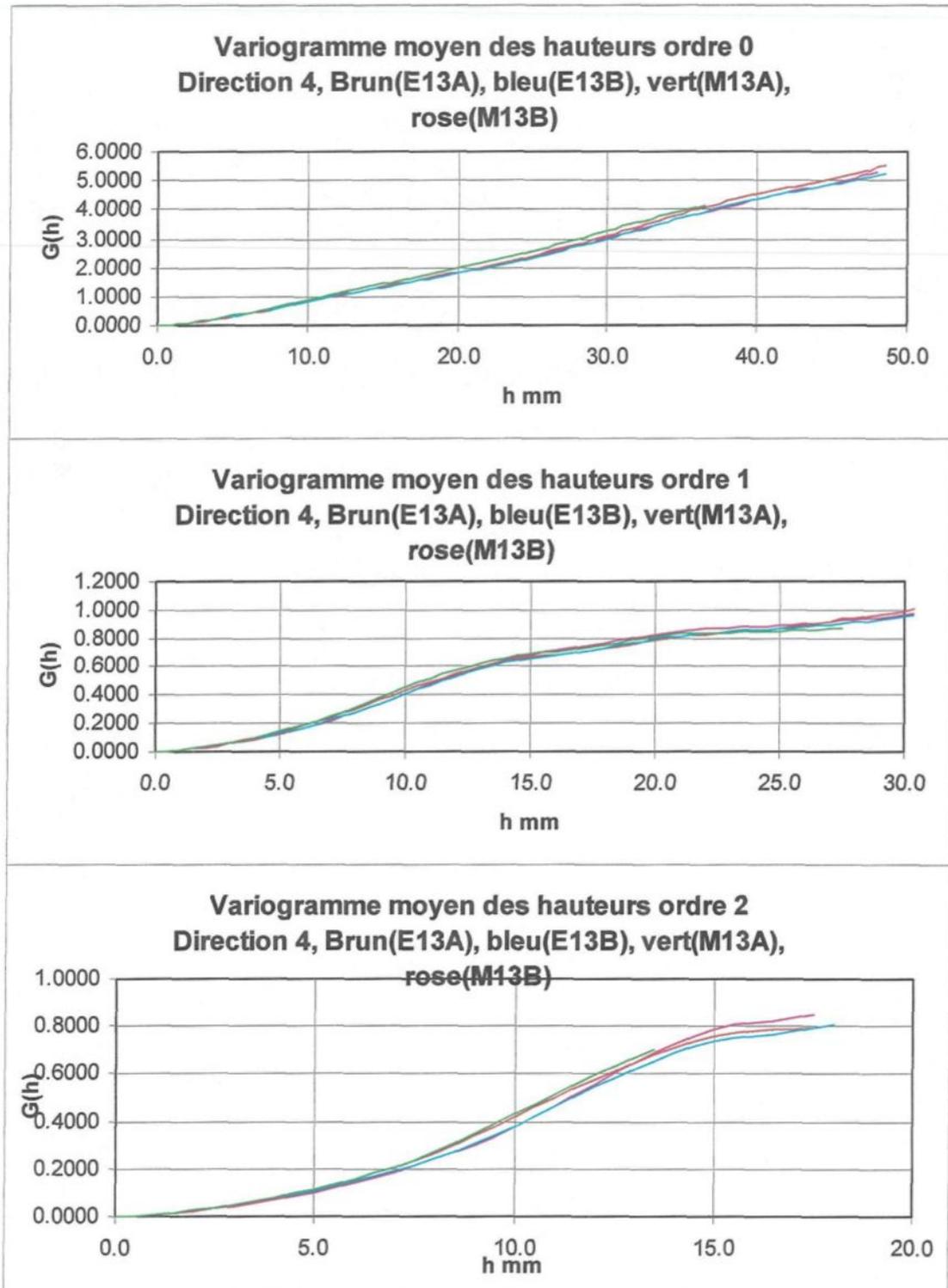
Il est à noter que nous n'avons pas de résultats pour l'essai 4. Par erreur, les profils après cisaillement n'ont pas été enregistrés.

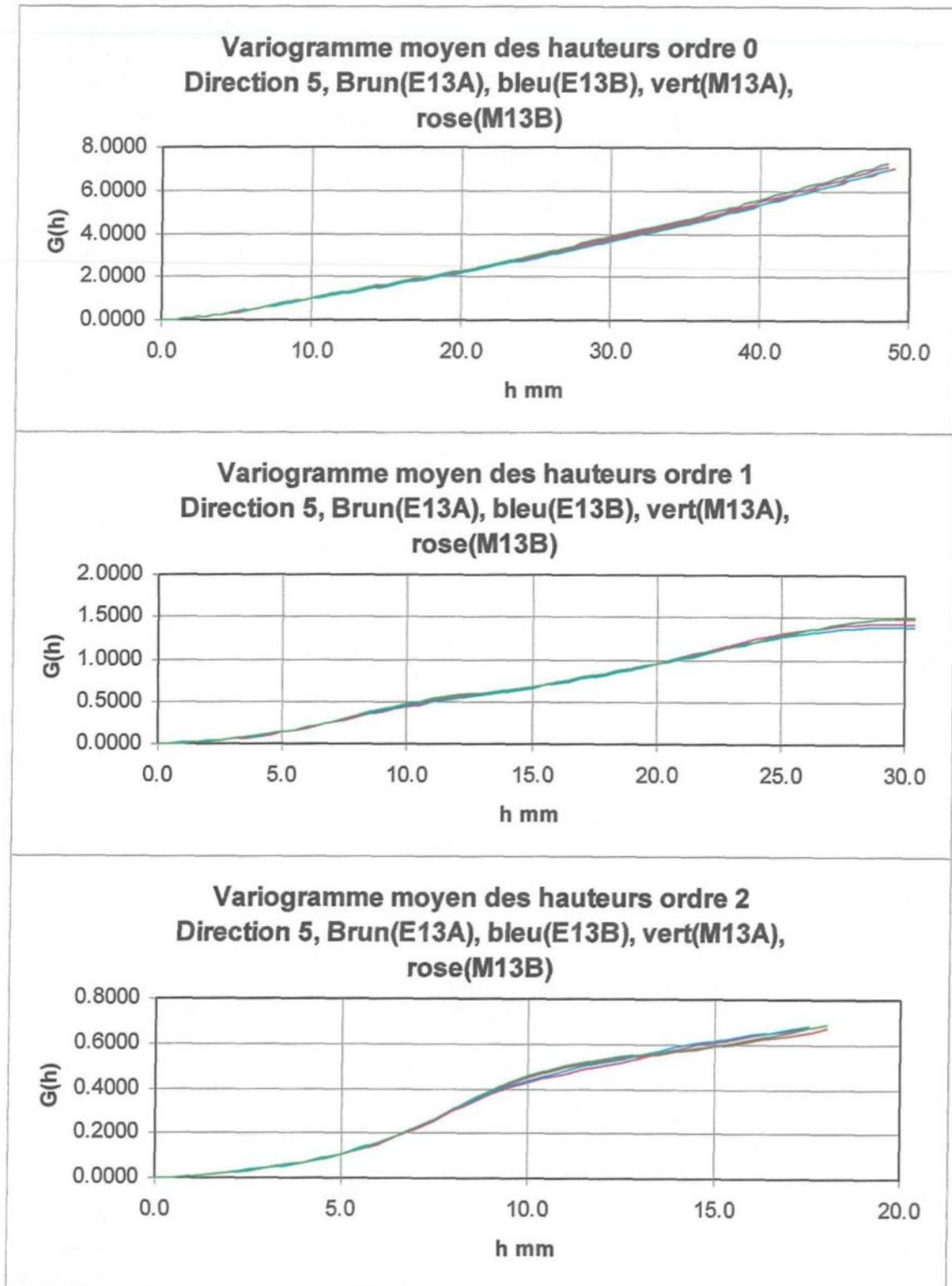


Essai 13, 3 Mpa, direction de cisaillement 1(0°)

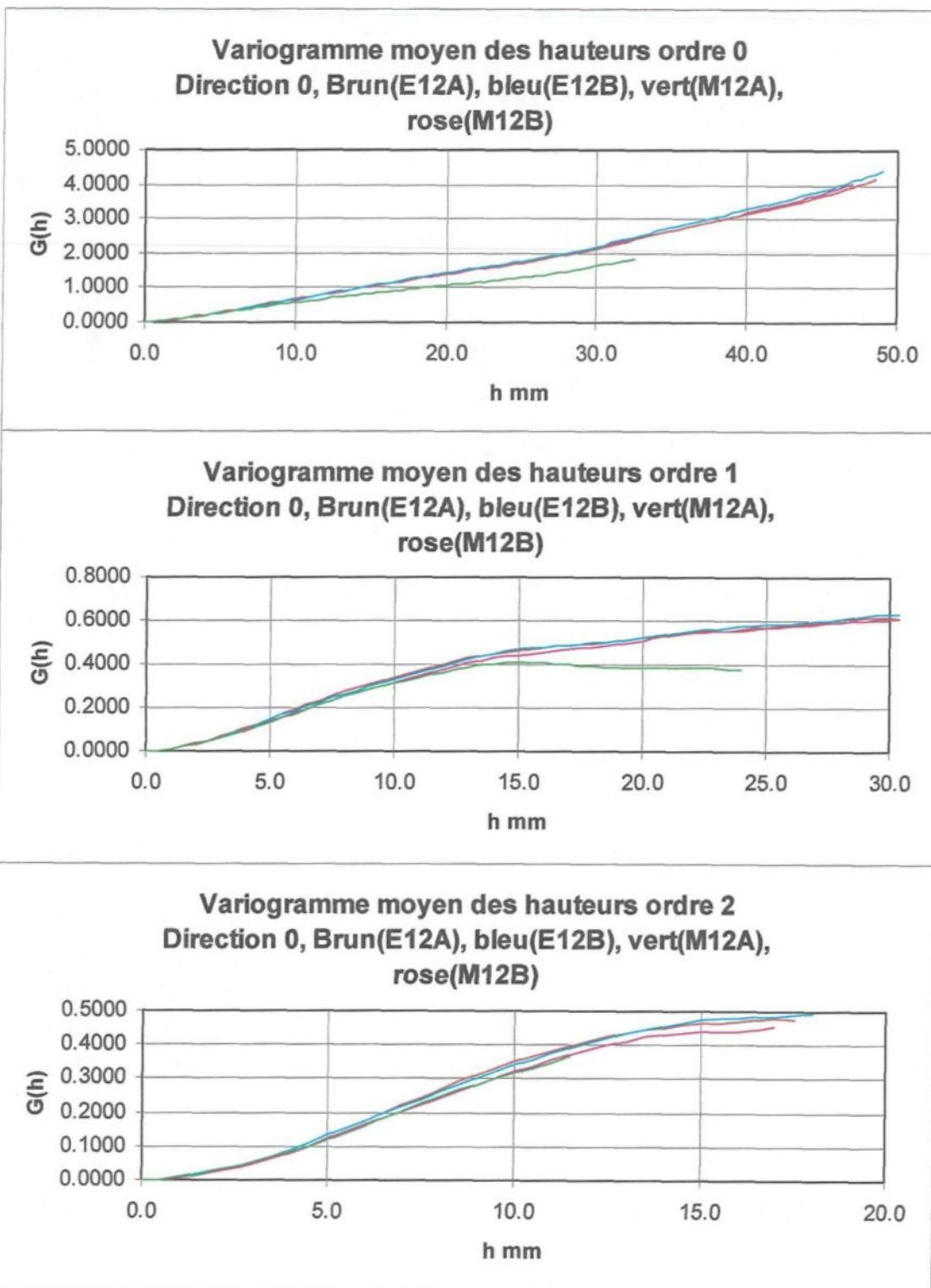


Essai 13, 3 Mpa, direction de cisaillement 1(0°)

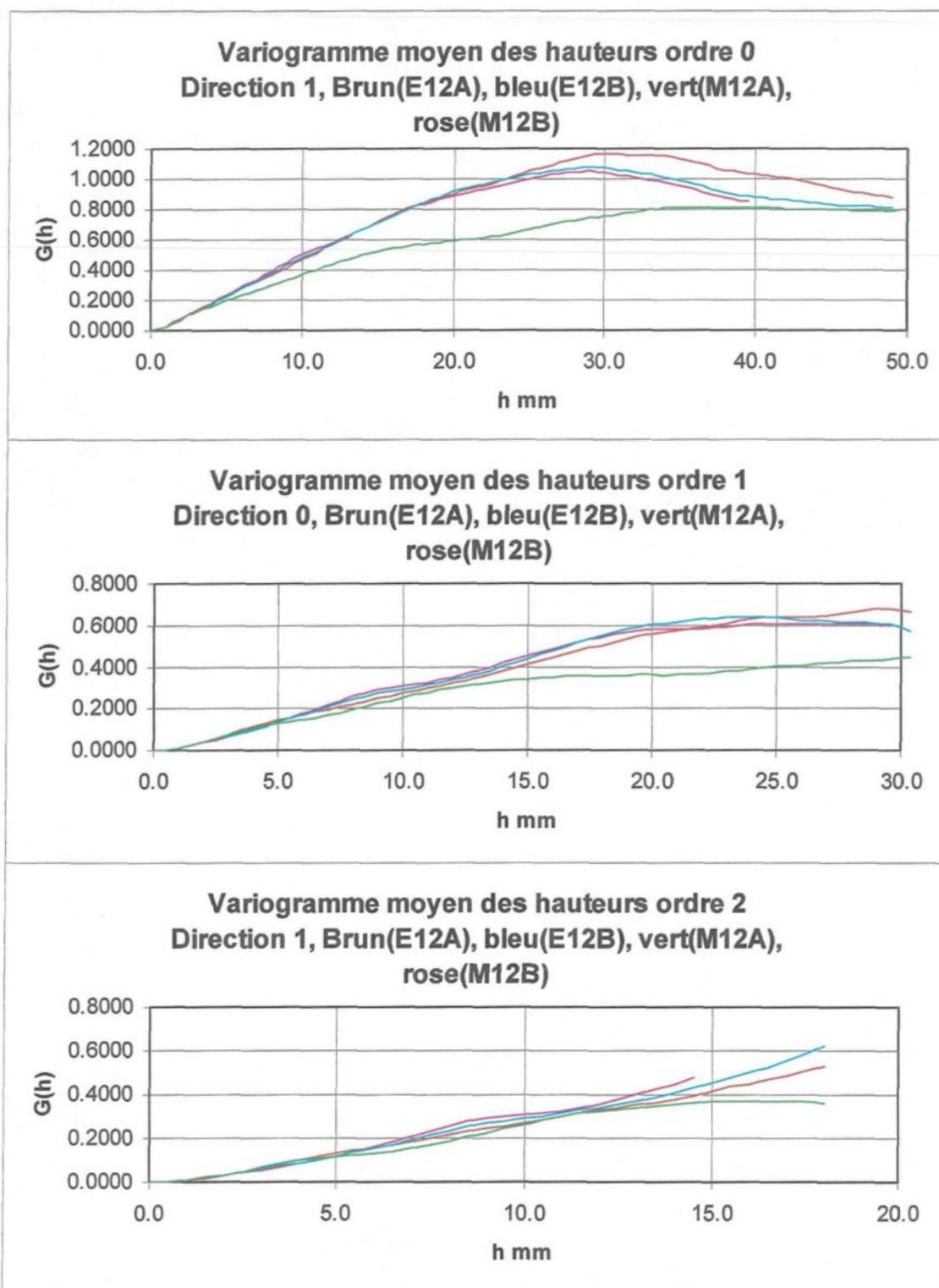




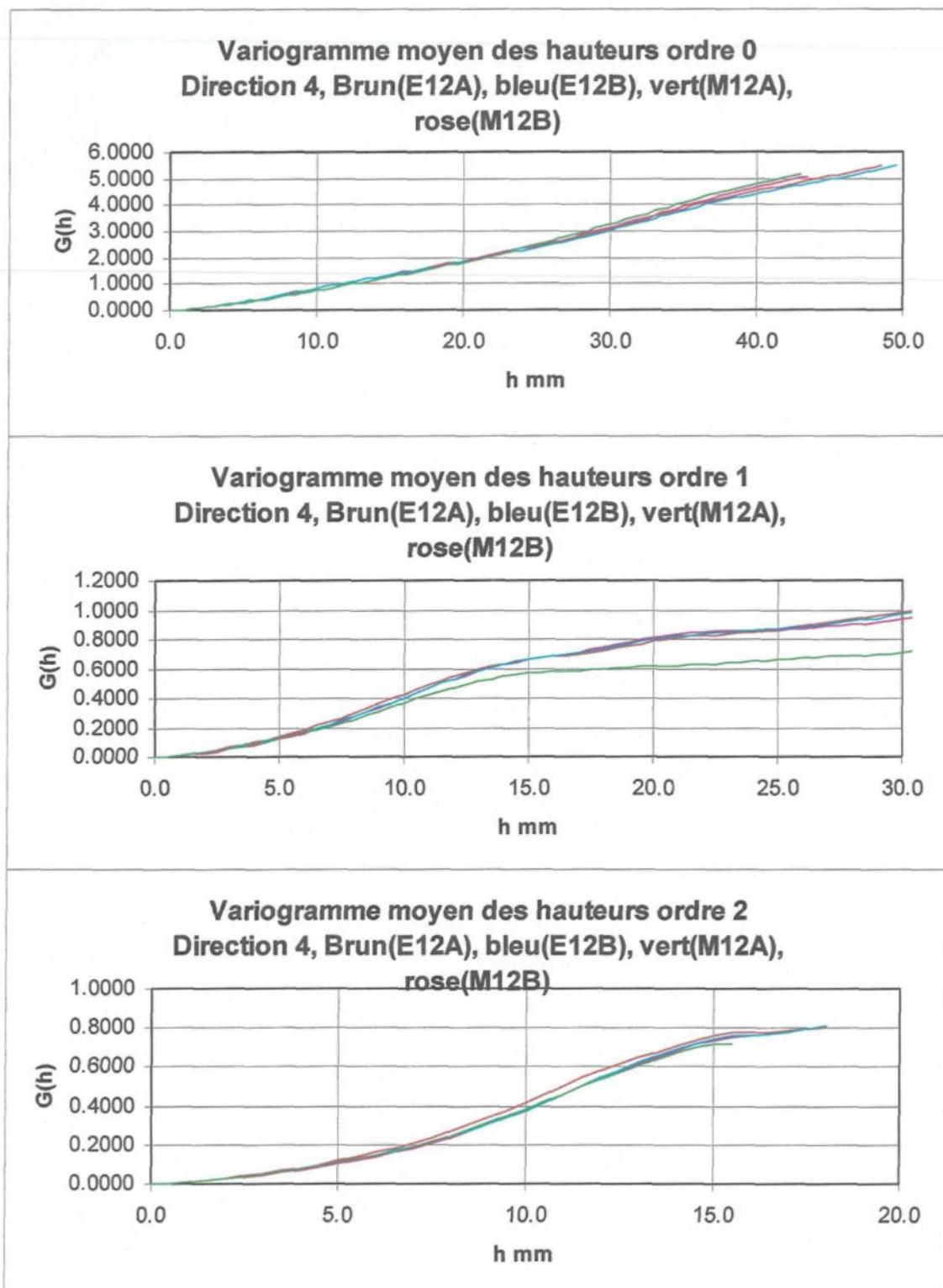
Essai 13, 3 Mpa, direction de cisaillement 1(0°)

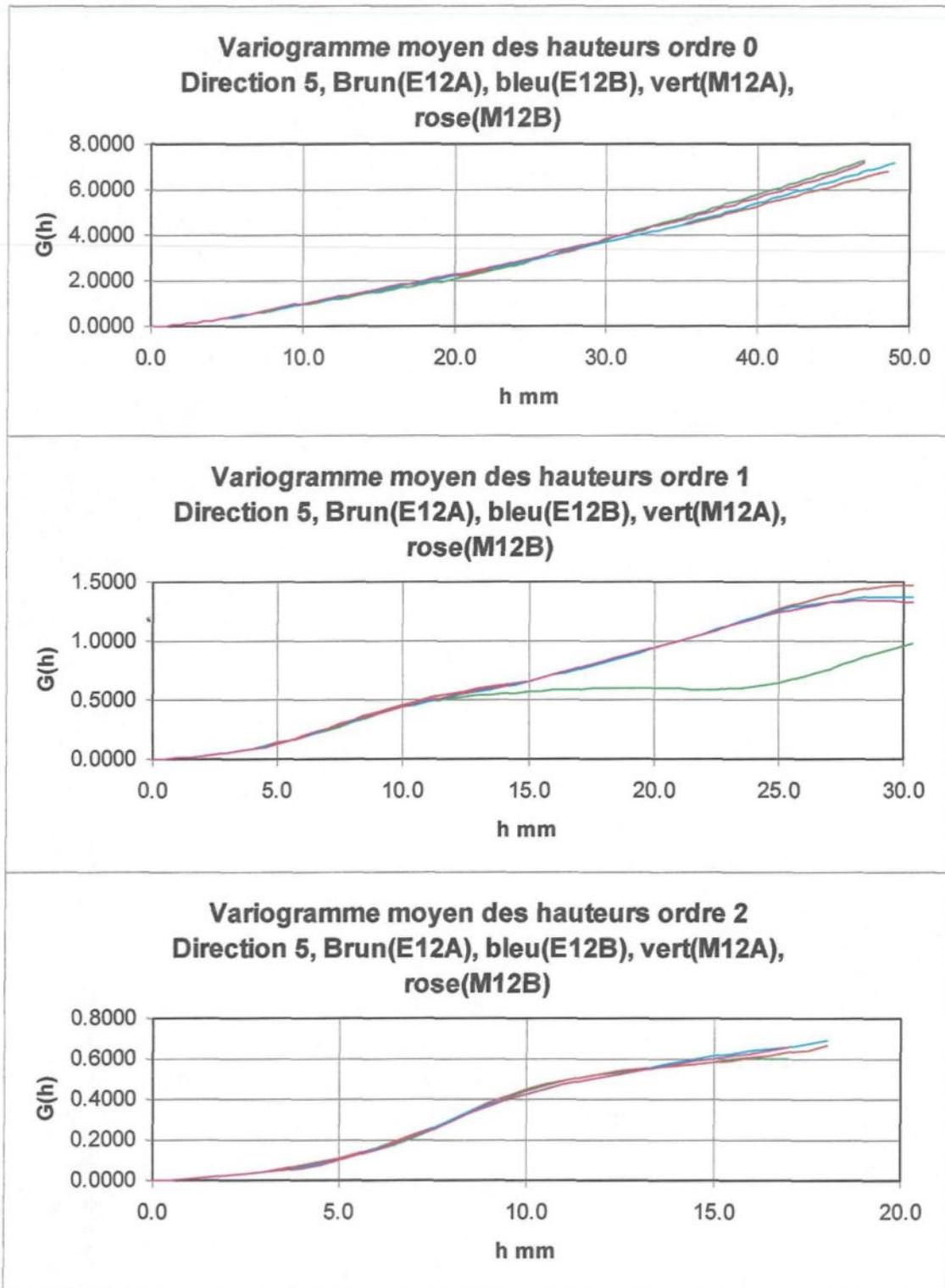


Essai 12, 3 Mpa, direction de cisaillement 5(90°)



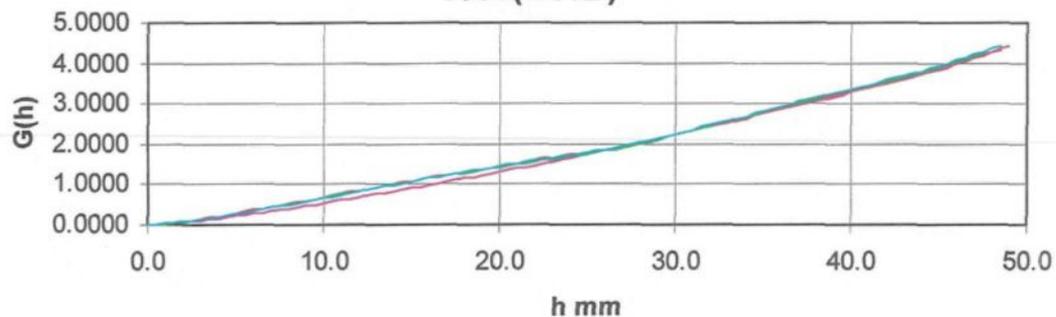
Essai 12, 3 Mpa, direction de cisaillement 5(90°)



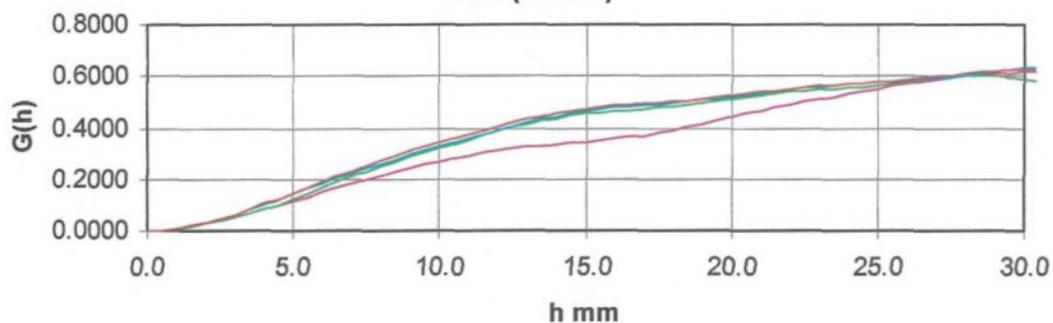


Essai 12, 3 Mpa, direction de cisaillement 5(90°)

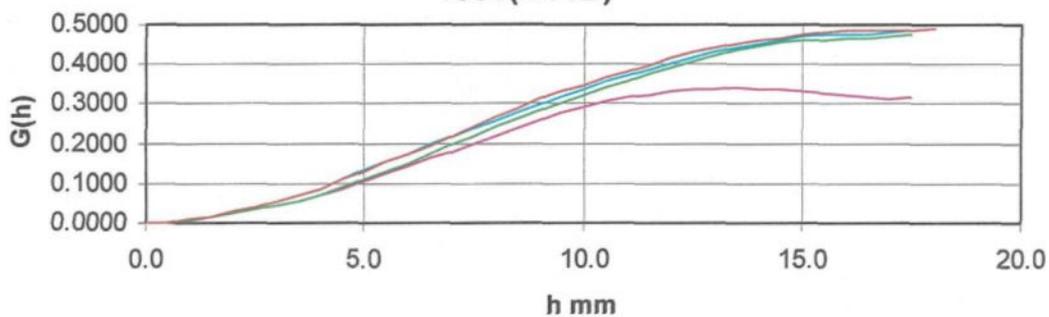
Variogramme moyen des hauteurs ordre 0
Direction 0, Brun(E011A), bleu(E11B), vert(M11A),
rose(M11B)



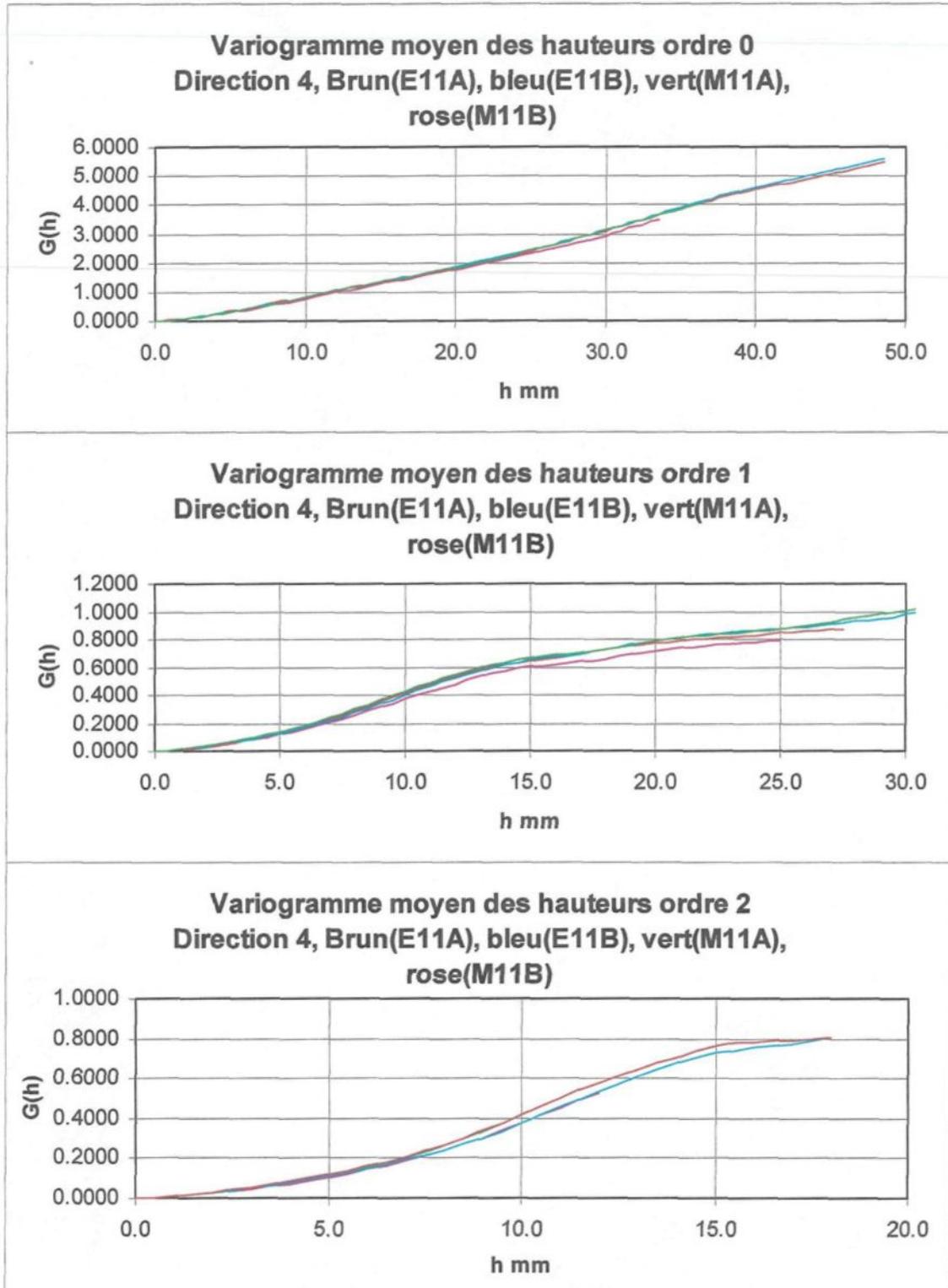
Variogramme moyen des hauteurs ordre 1
Direction 0, Brun(E11A), bleu(E11B), vert(M11A),
rose(M11B)



Variogramme moyen des hauteurs ordre 2
Direction 0, Brun(E11A), bleu(E11B), vert(M11A),
rose(M11B)

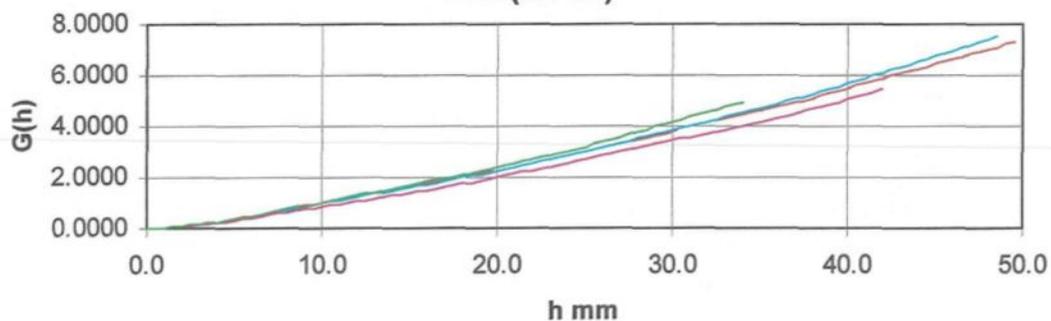


Essai 11, 3 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

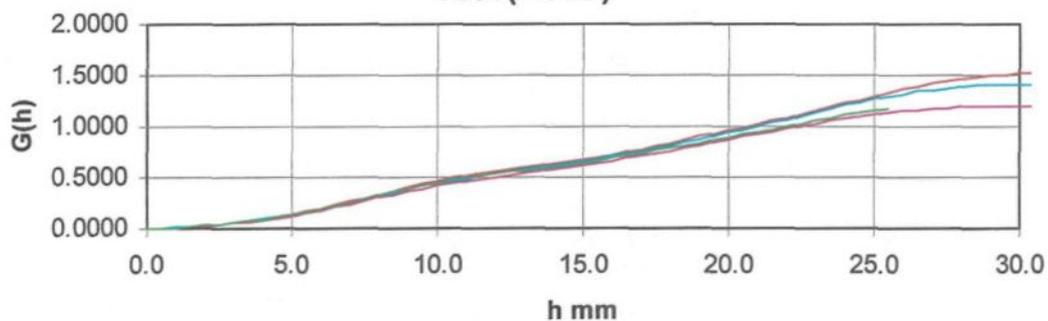


Essai 11, 3 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

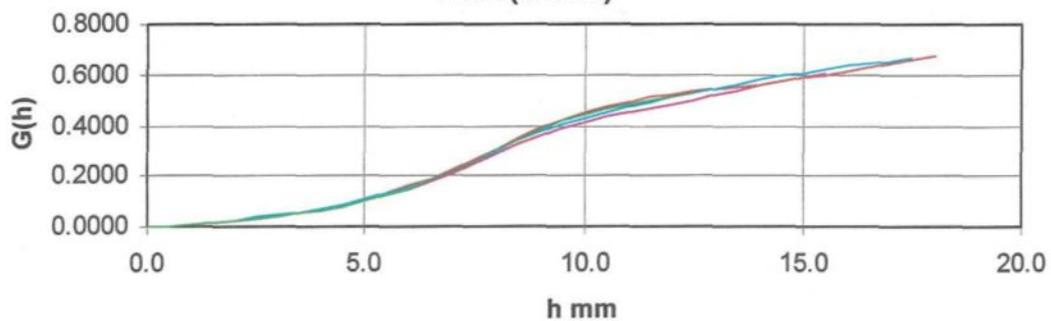
Variogramme moyen des hauteurs ordre 0
Direction 5, Brun(E11A), bleu(E11B), vert(M11A),
rose(M11B)



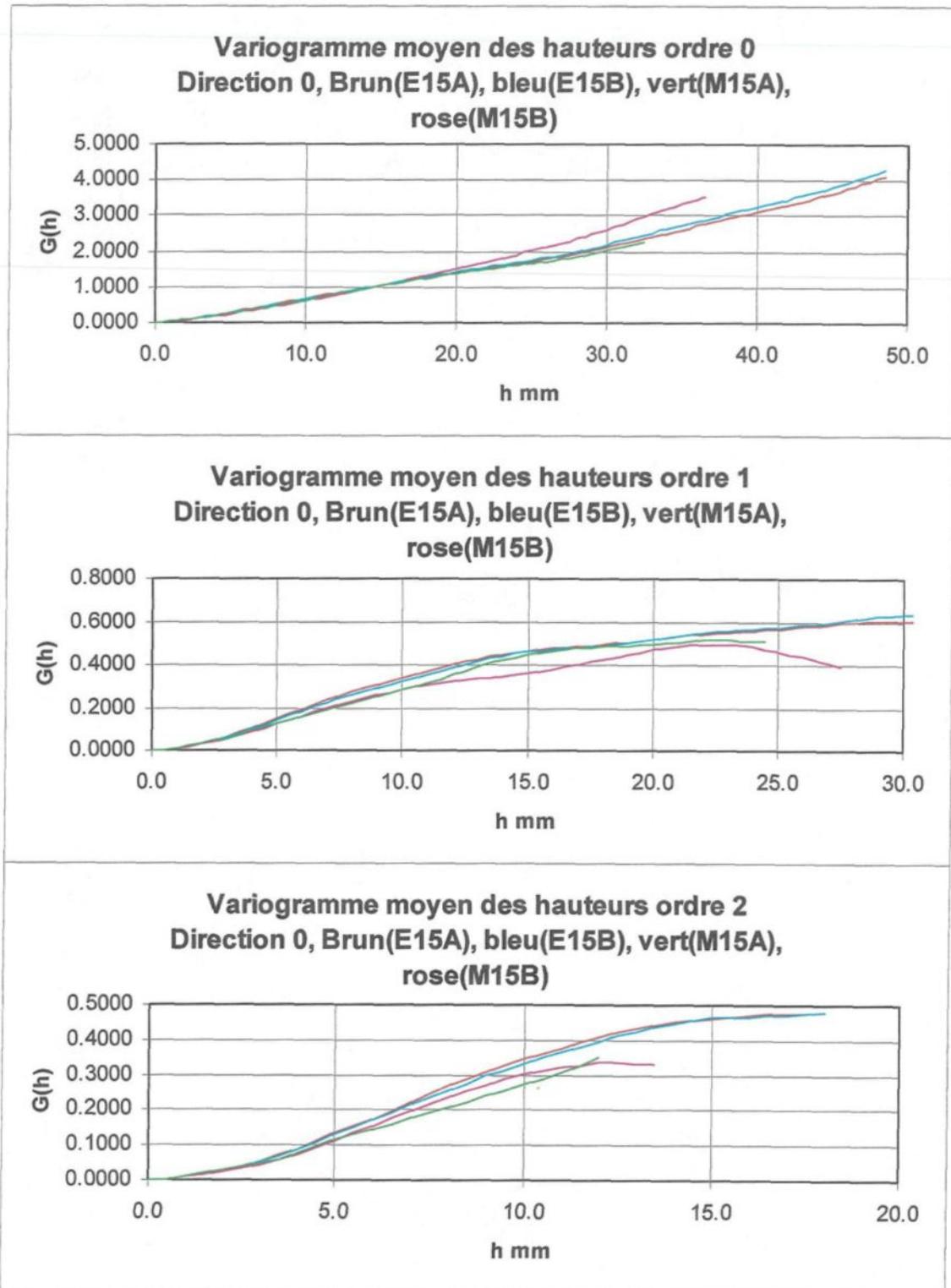
Variogramme moyen des hauteurs ordre 1
Direction 5, Brun(E11A), bleu(E11B), vert(M11A),
rose(M11B)

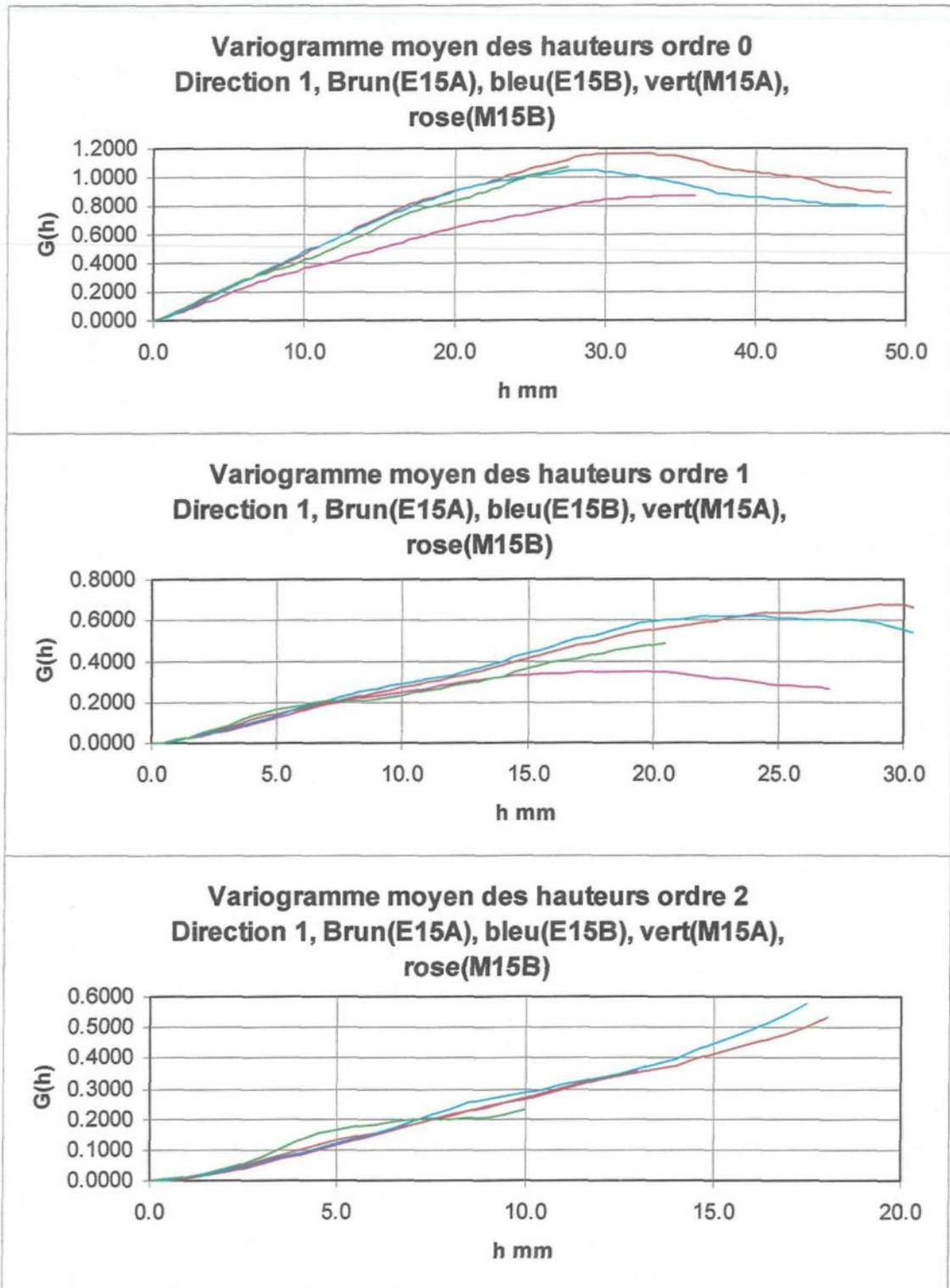


Variogramme moyen des hauteurs ordre 2
Direction 5, Brun(E11A), bleu(E11B), vert(M11A),
rose(M11B)

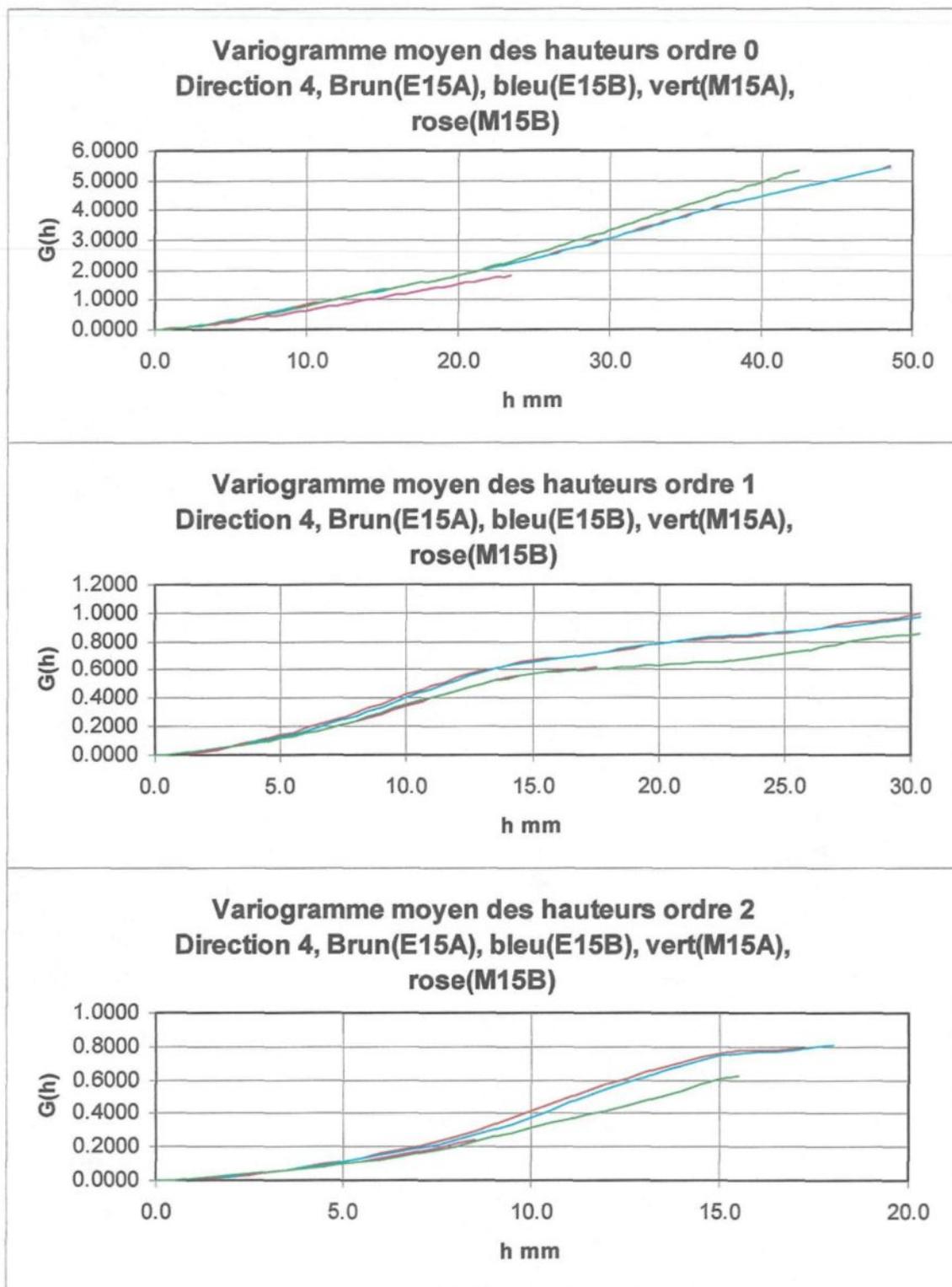


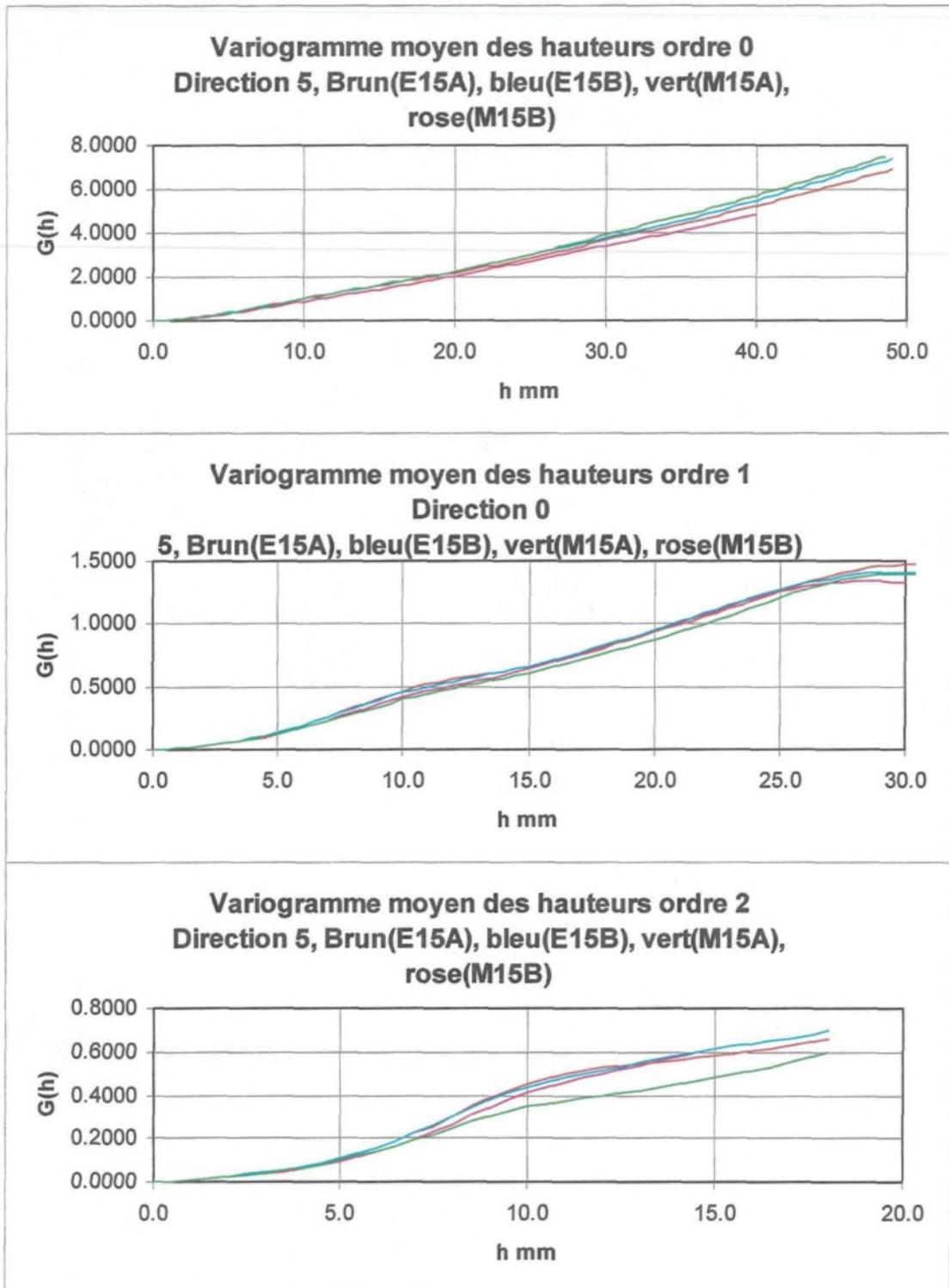
Essai 11, 3 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

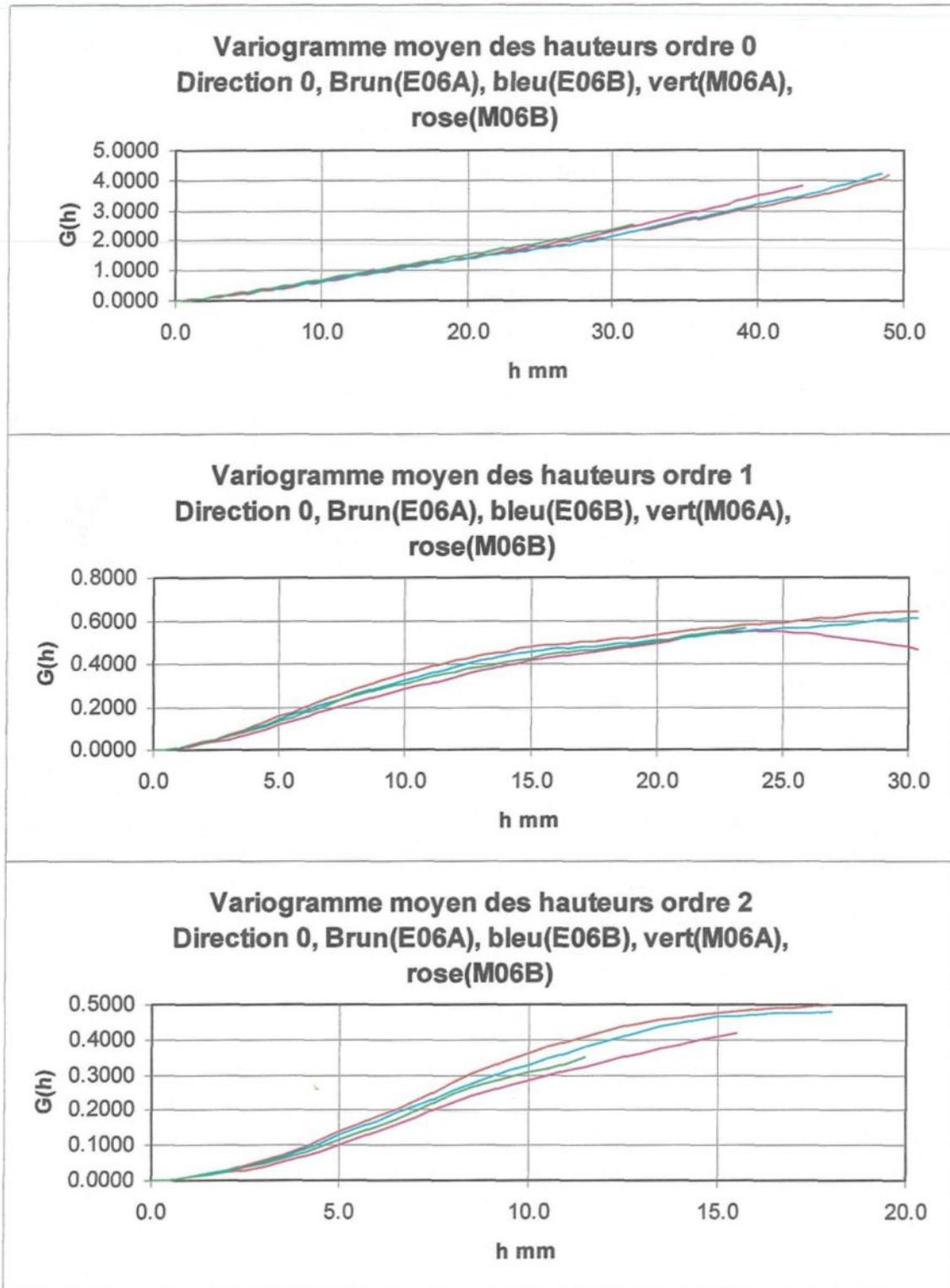




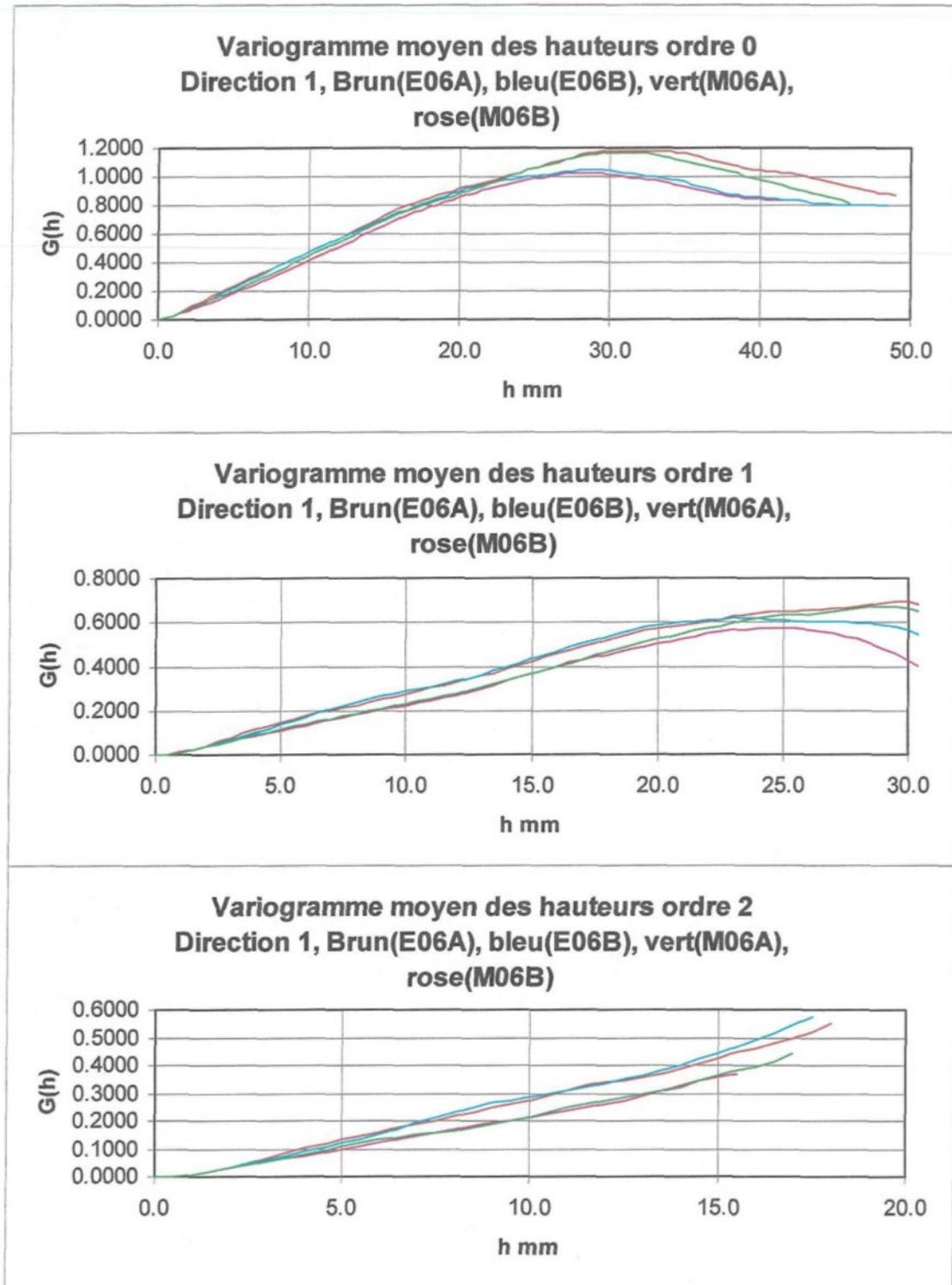
Essai 15, 3 Mpa, direction de cisaillement 2(270°)

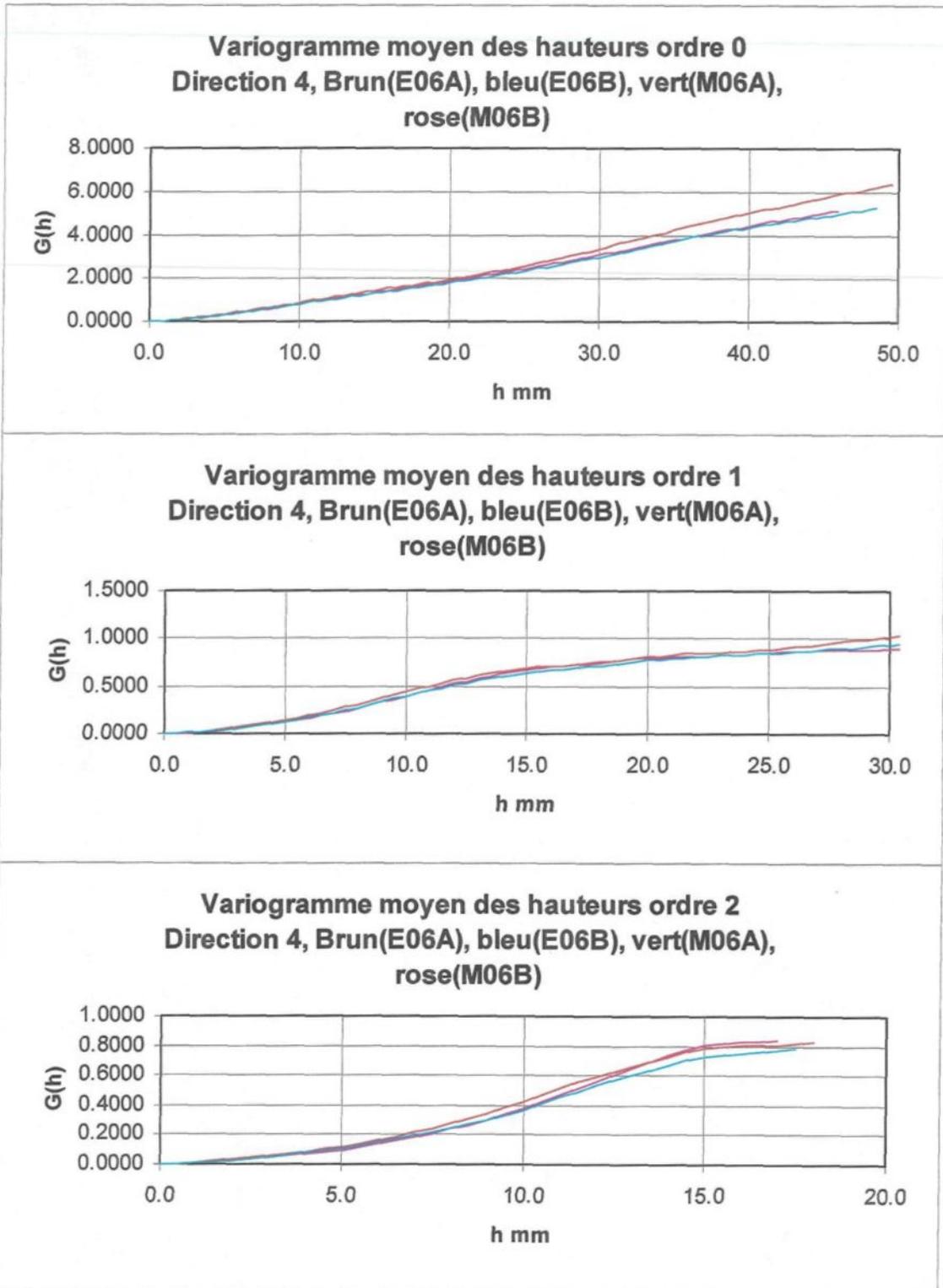




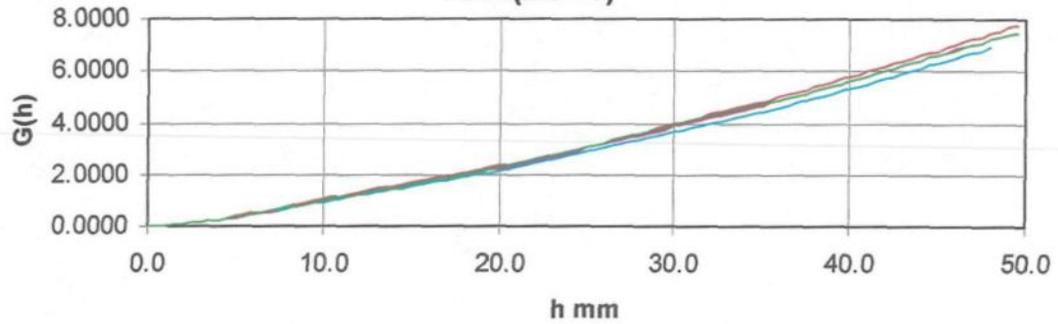


Essai 6, 5 Mpa, direction de cisaillement 1(0°)

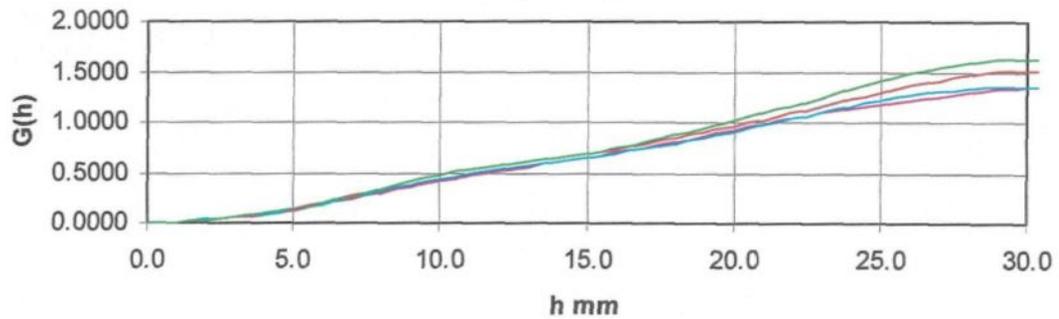




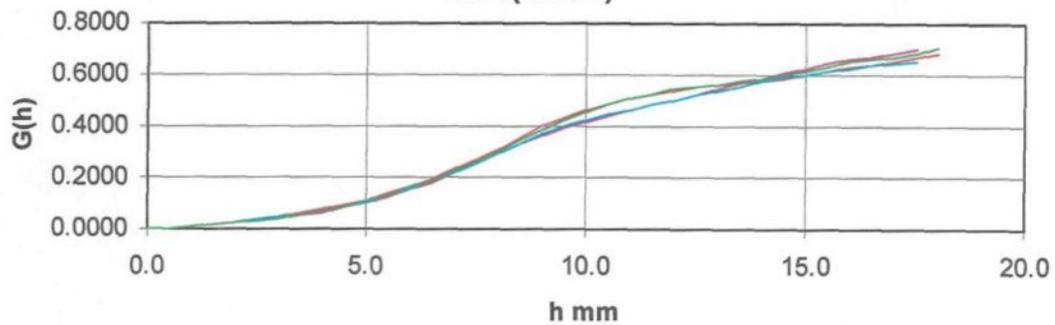
Variogramme moyen des hauteurs ordre 0
Direction 5, Brun(E06A), bleu(E06B), vert(M06A),
rose(M06B)



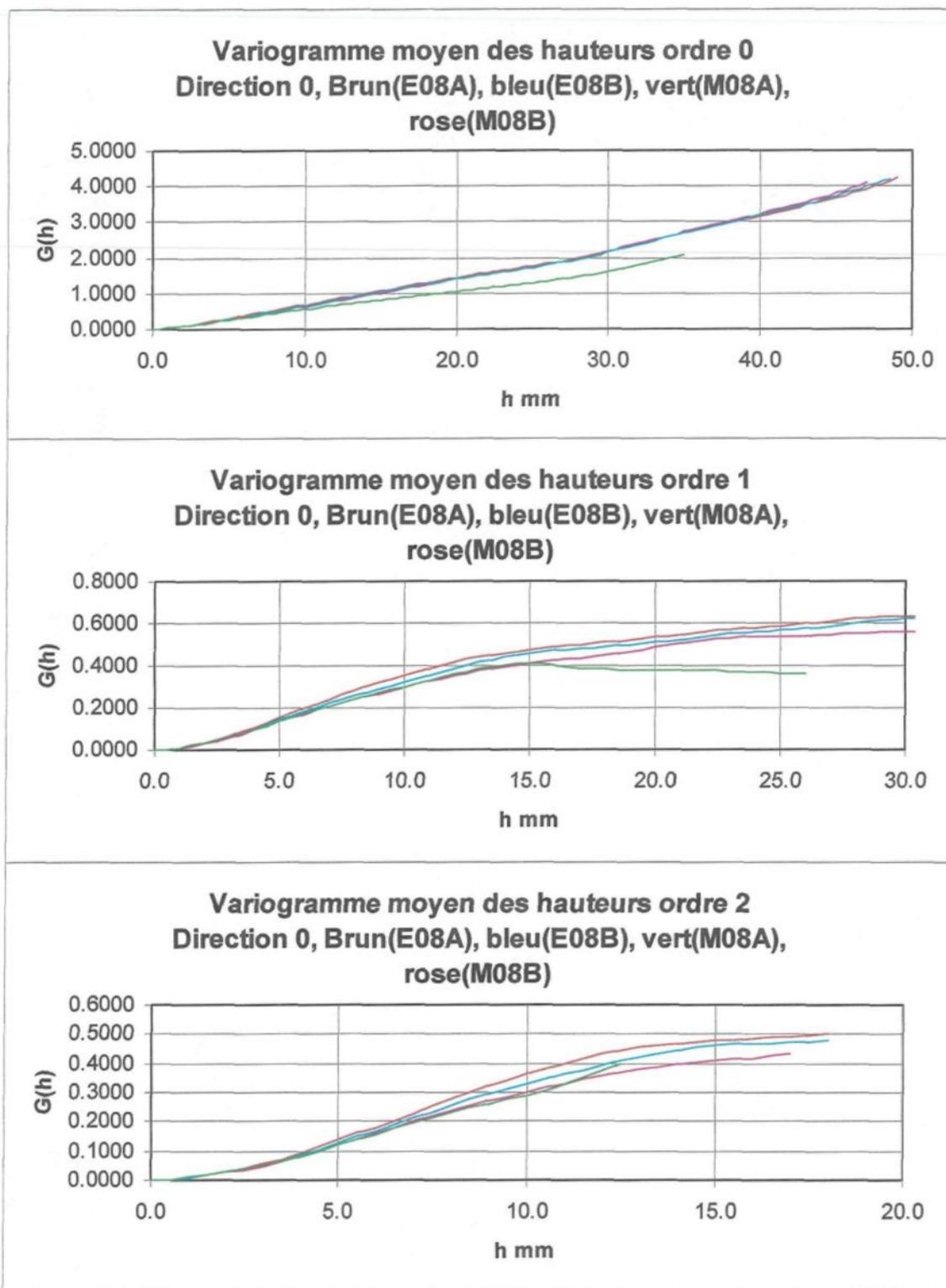
Variogramme moyen des hauteurs ordre 1
Direction 5, Brun(E06A), bleu(E06B), vert(M06A),
rose(M06B)

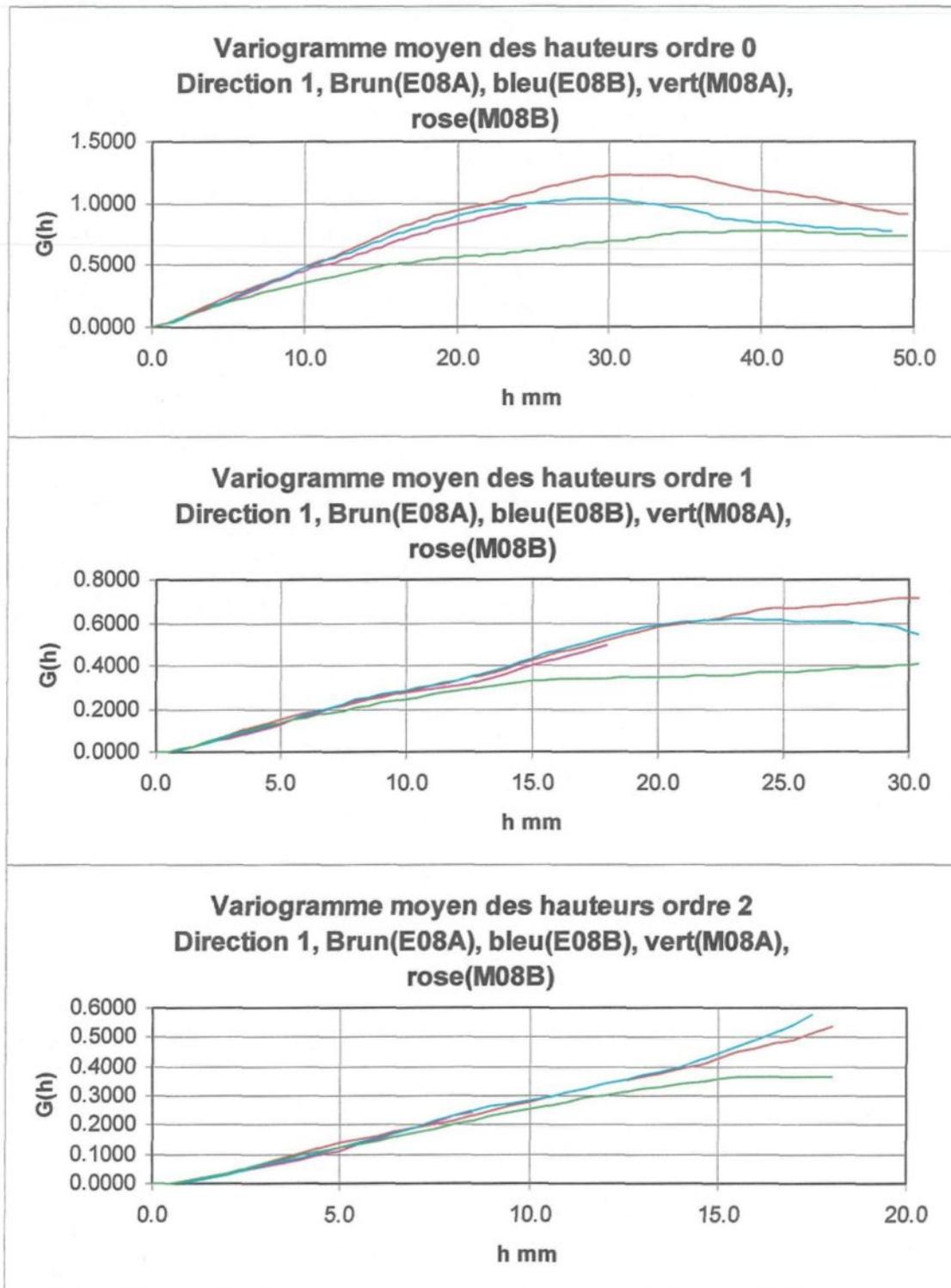


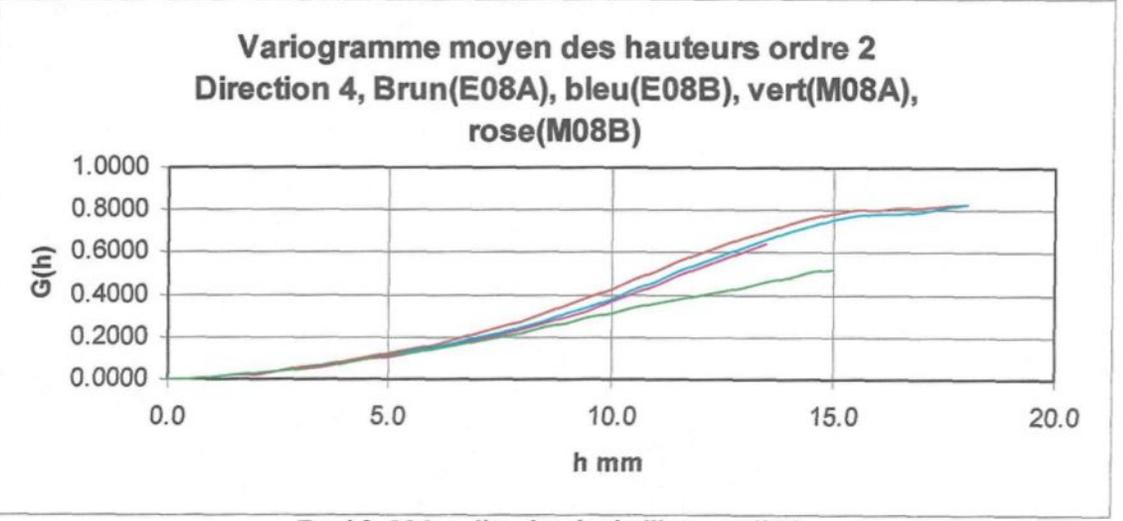
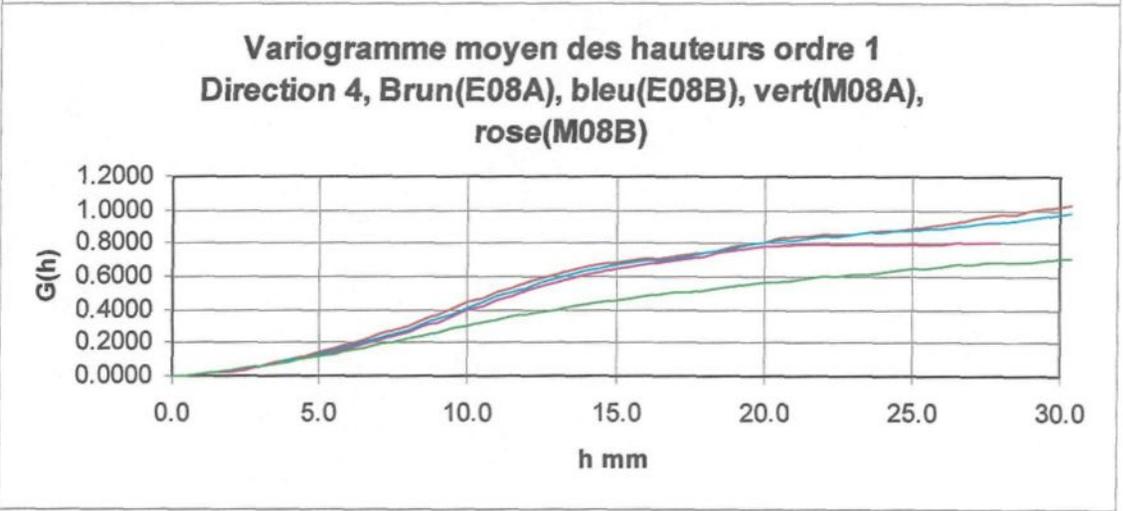
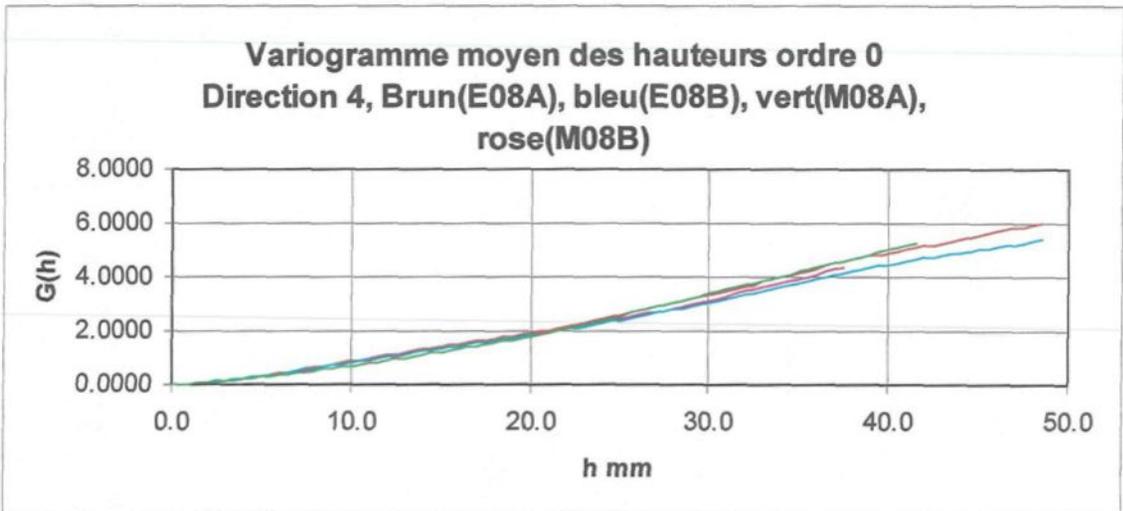
Variogramme moyen des hauteurs ordre 2
Direction 5, Brun(E06A), bleu(E06B), vert(M06A),
rose(M06B)



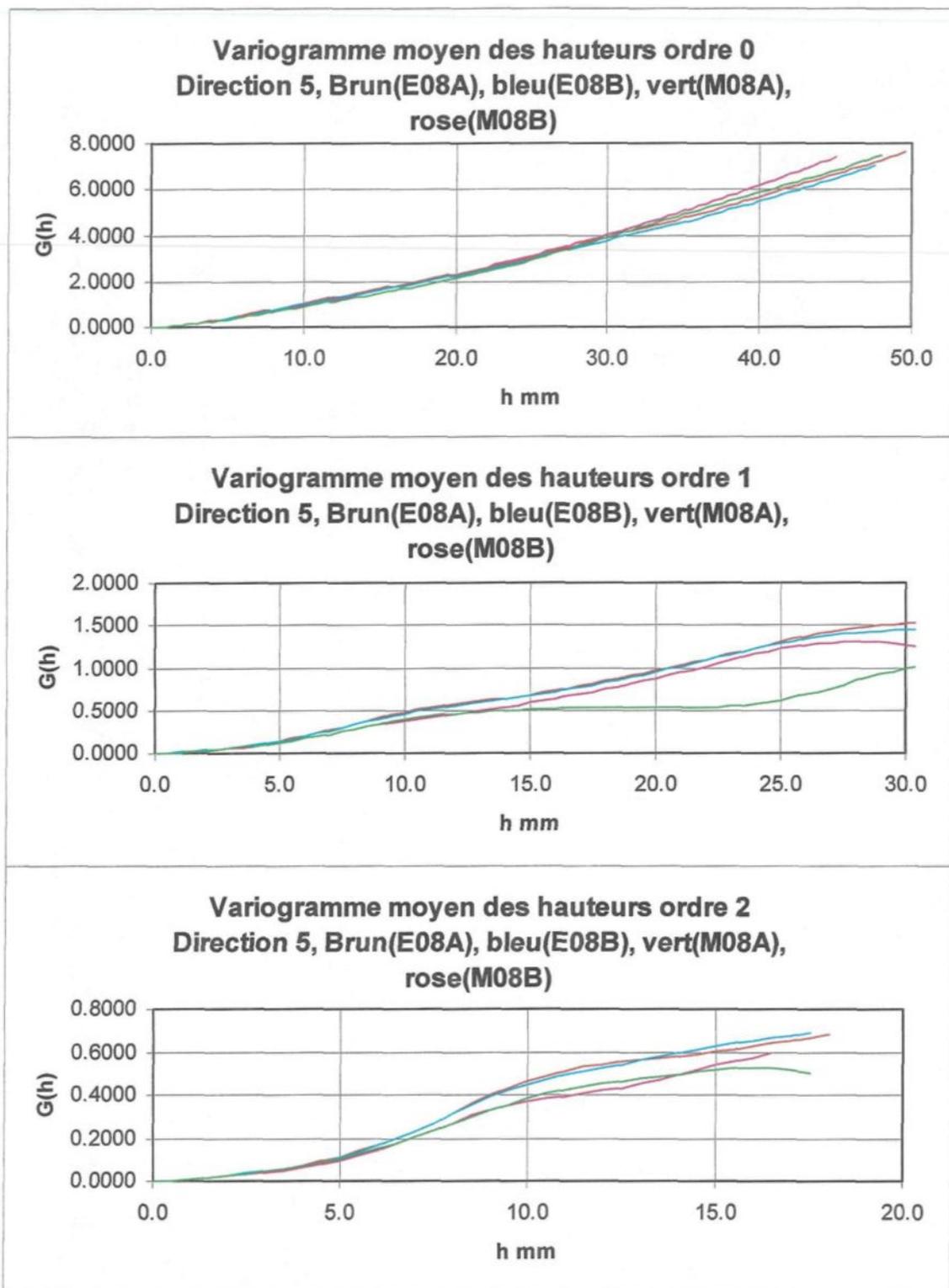
Essai 6, 5 Mpa, direction de cisaillement 1(0°)

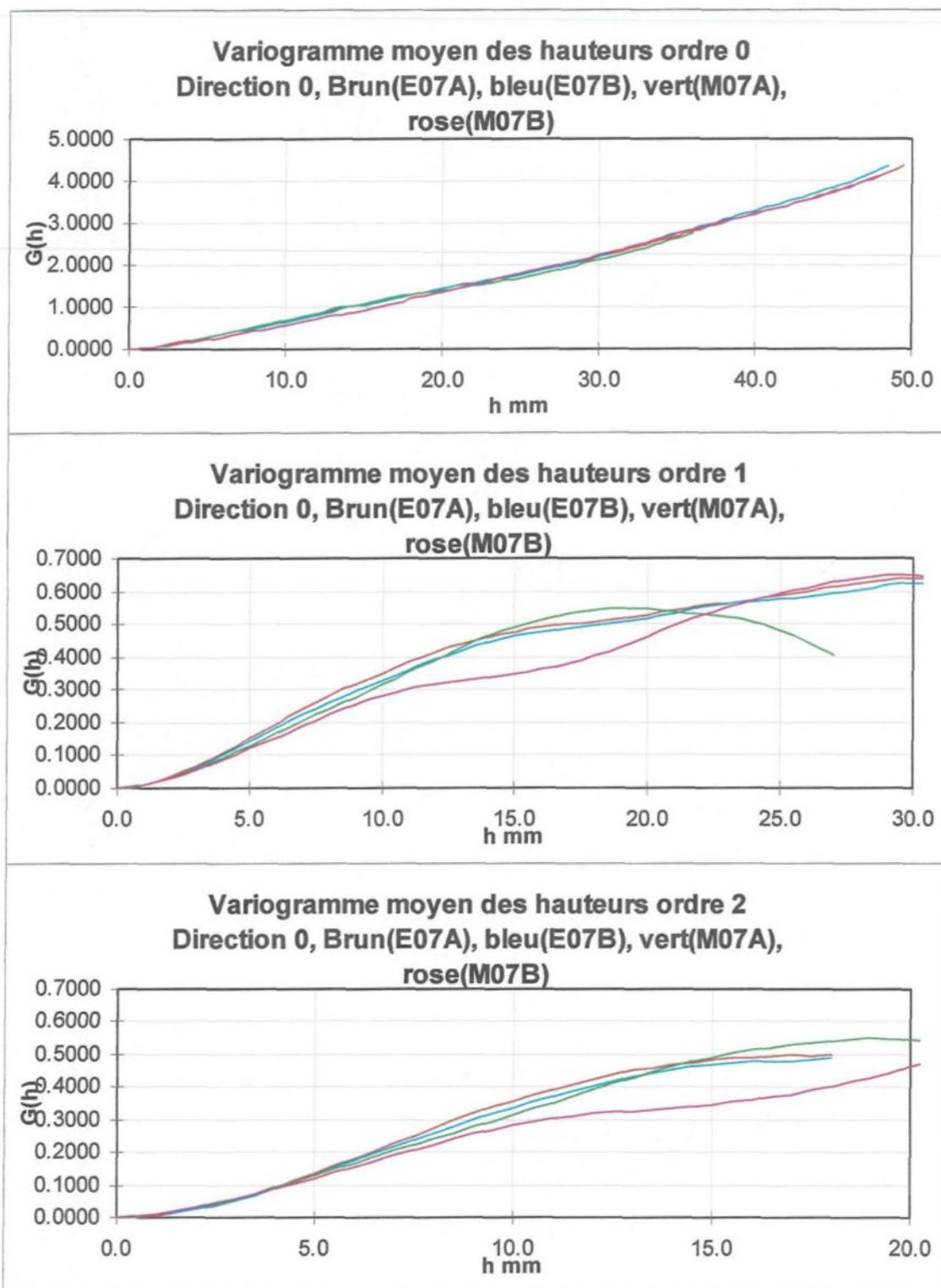




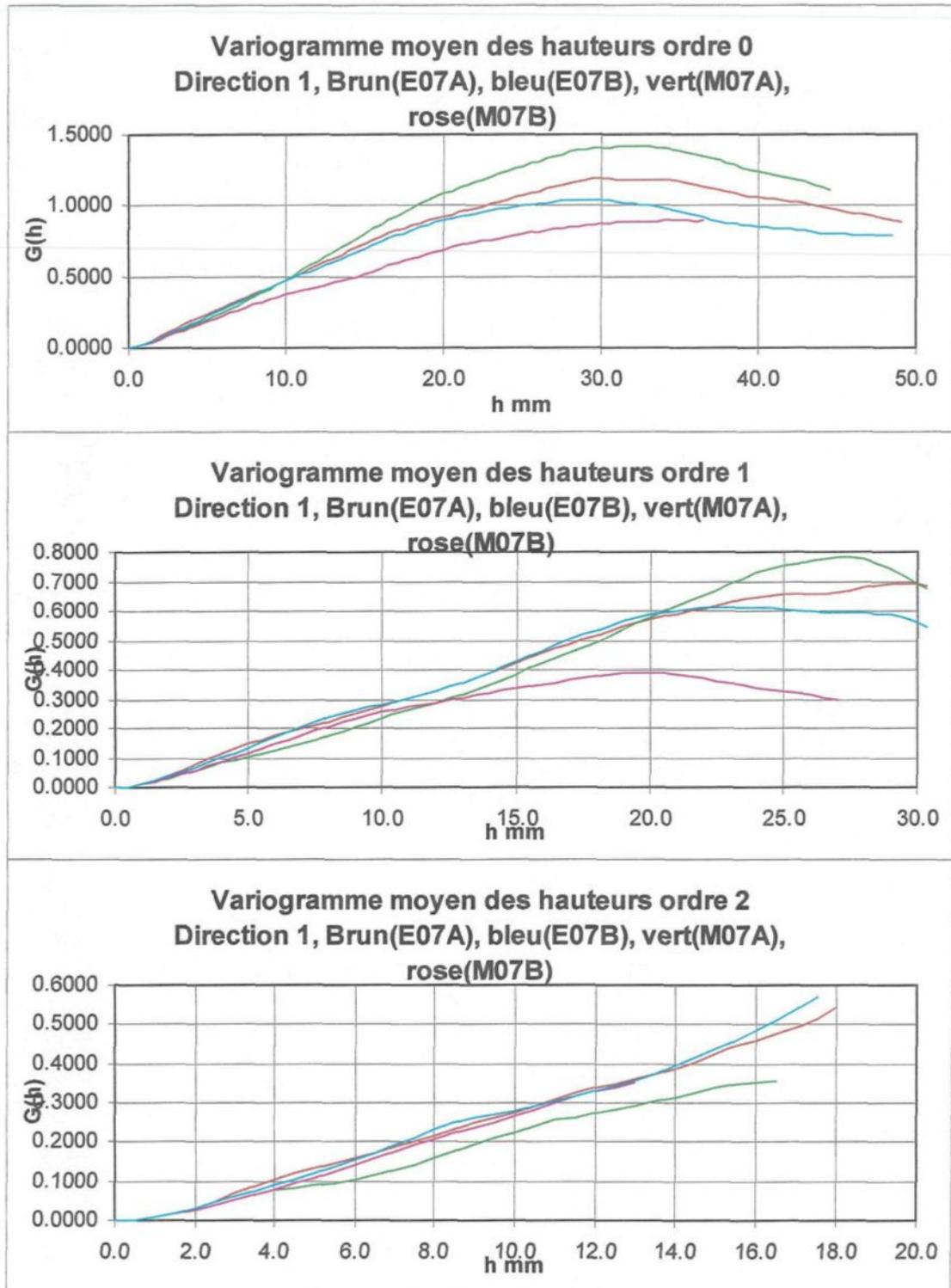


Essai 8, 5 Mpa, direction de cisaillement 5(90°)

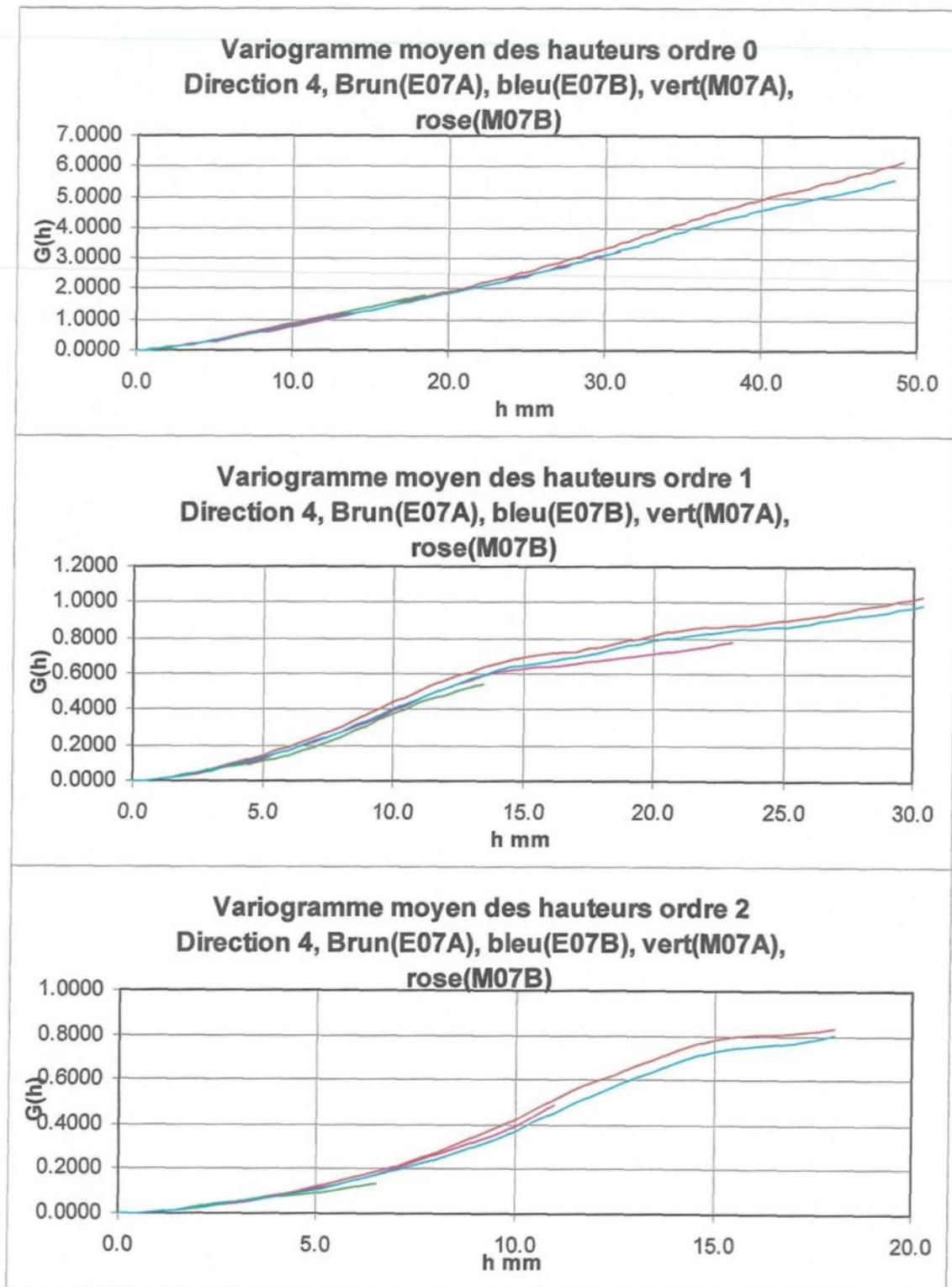


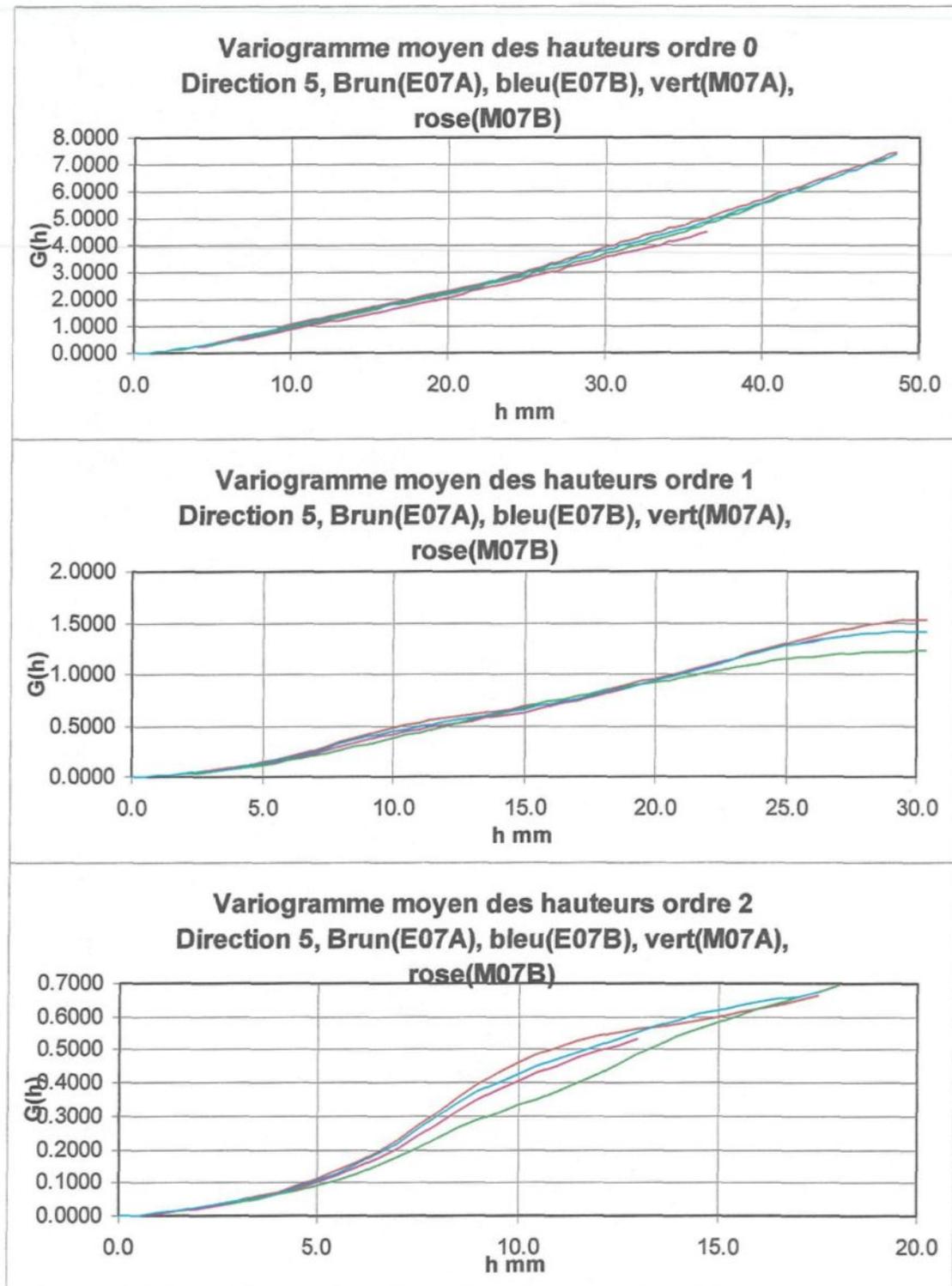


Essai 7, 5 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

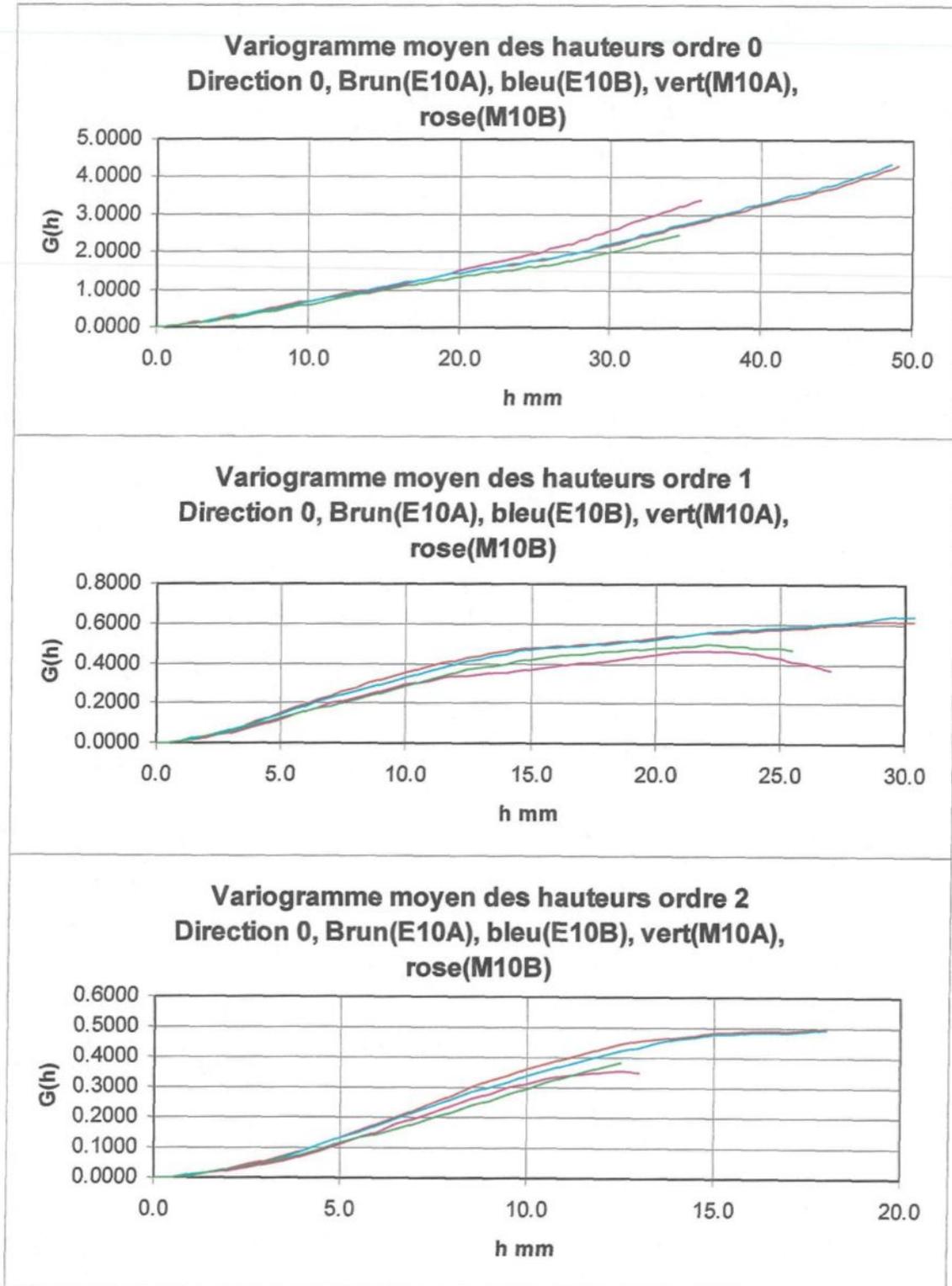


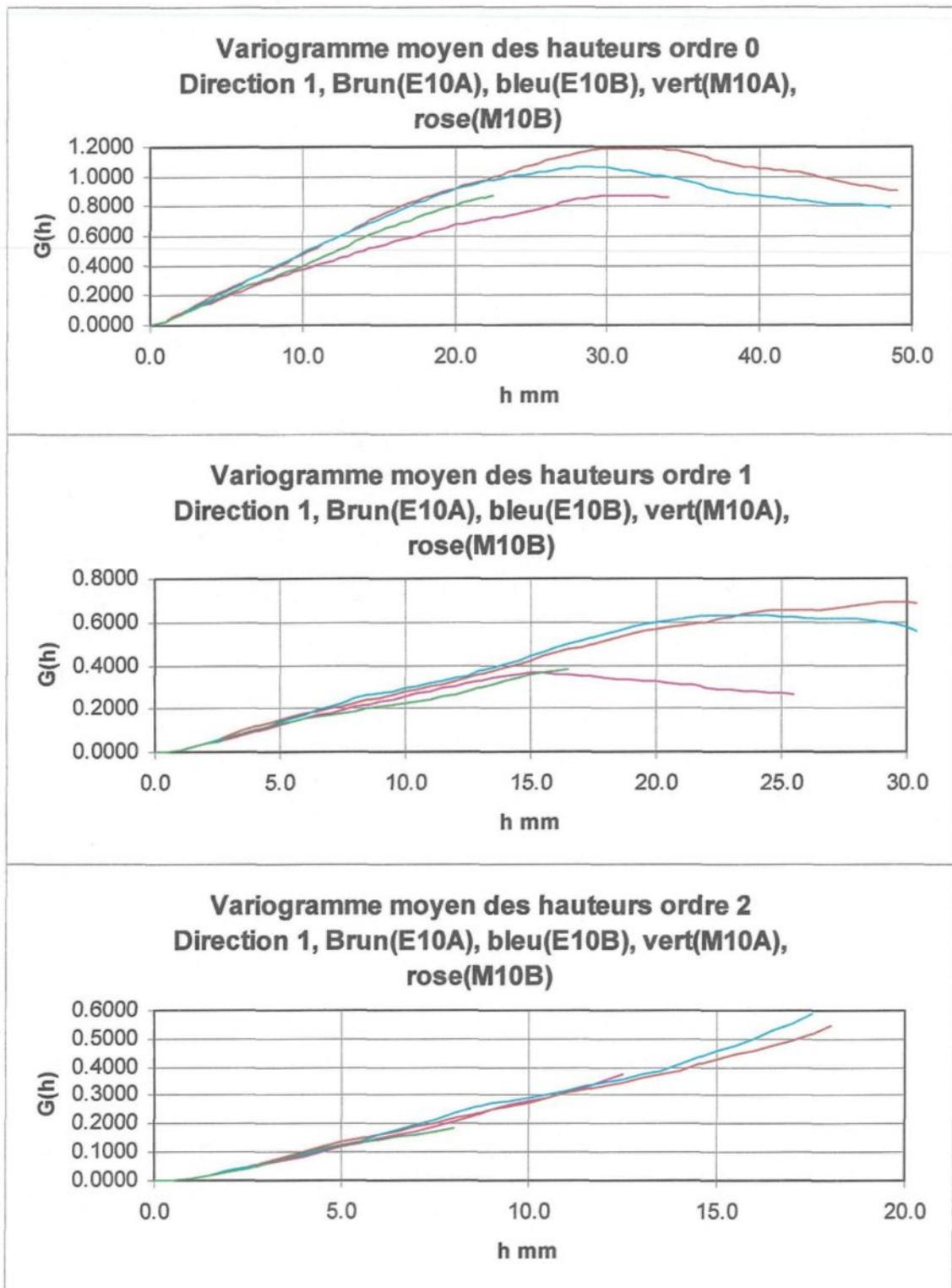
Essai 7, 5 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

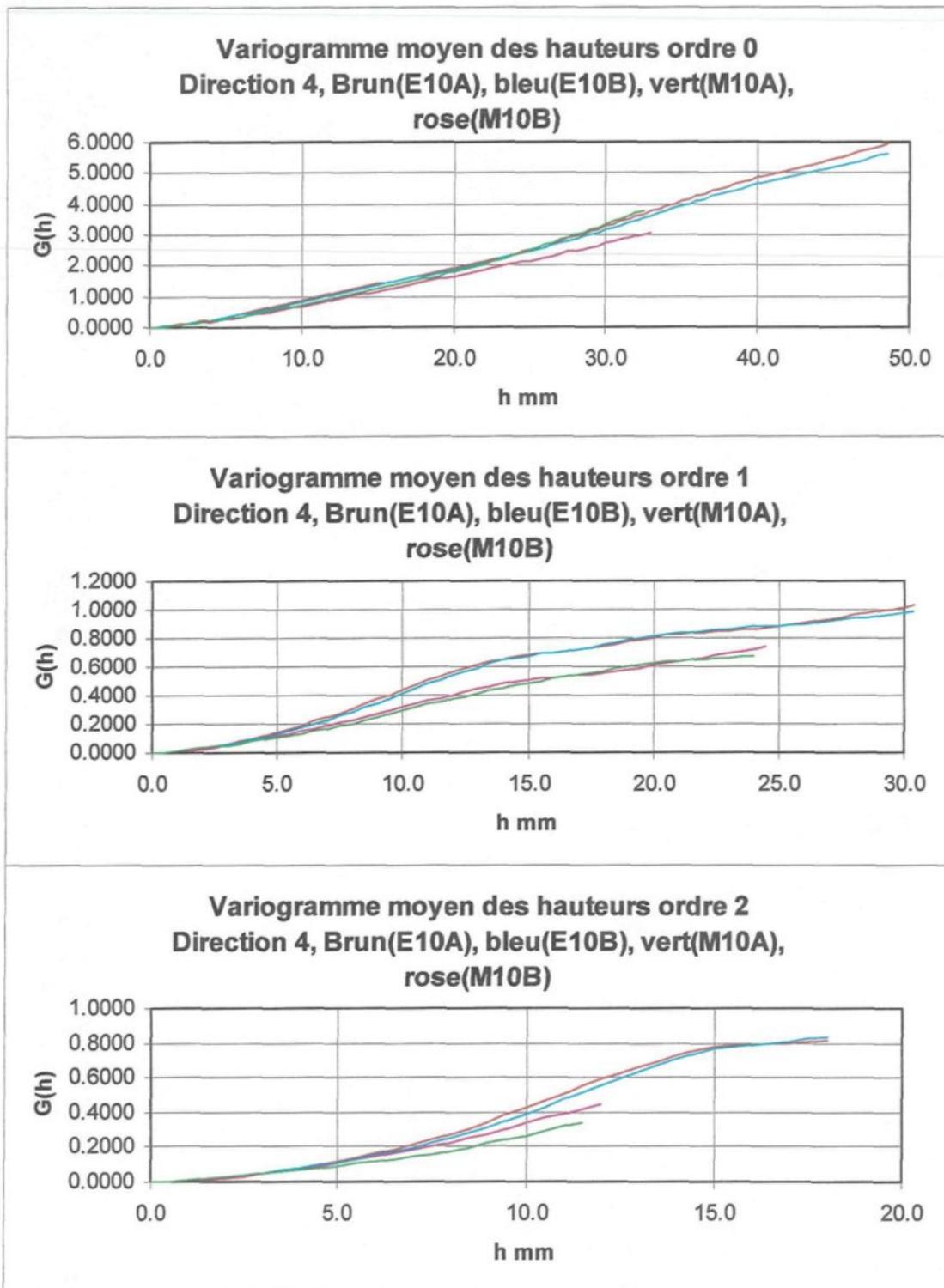


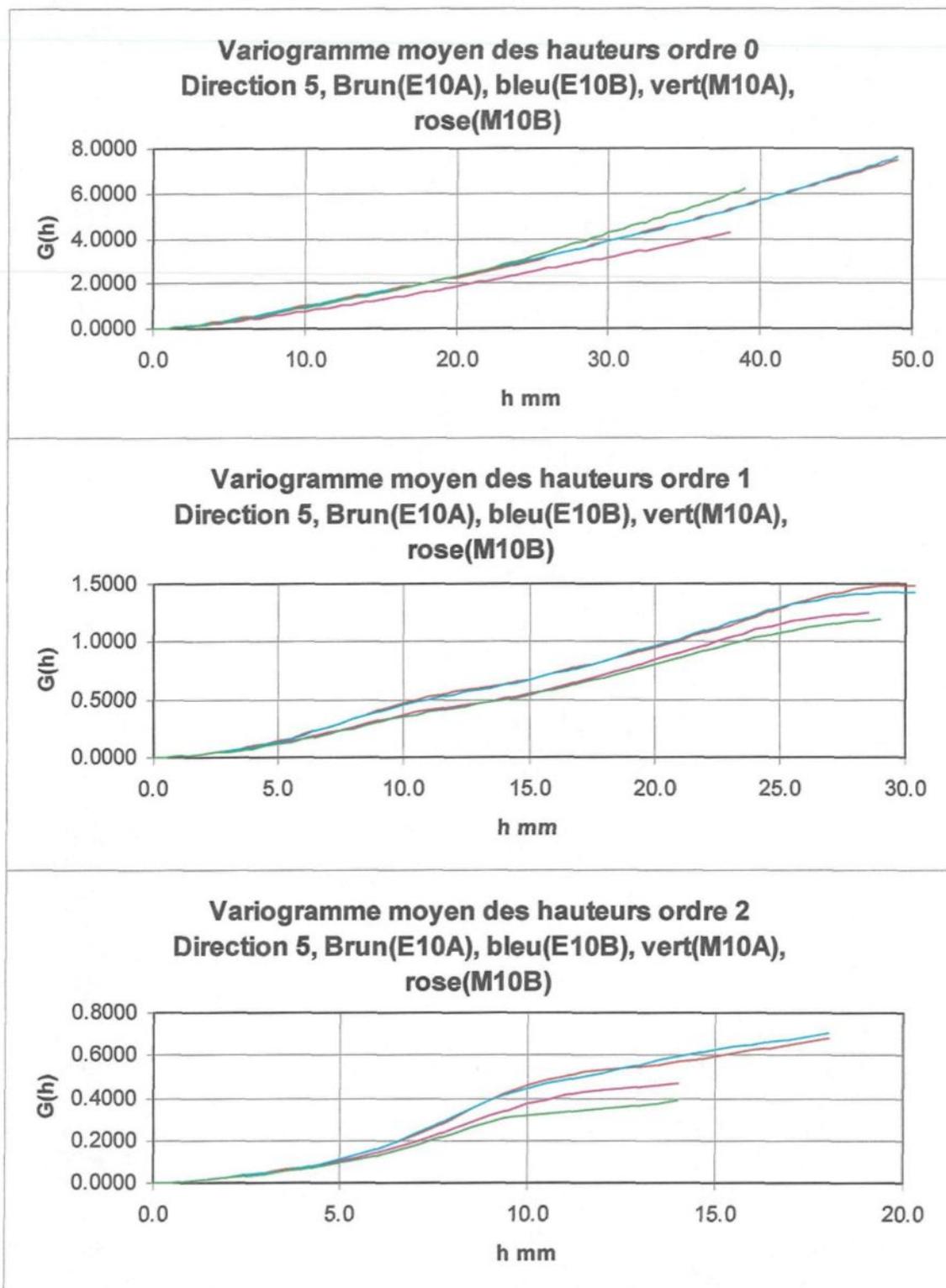


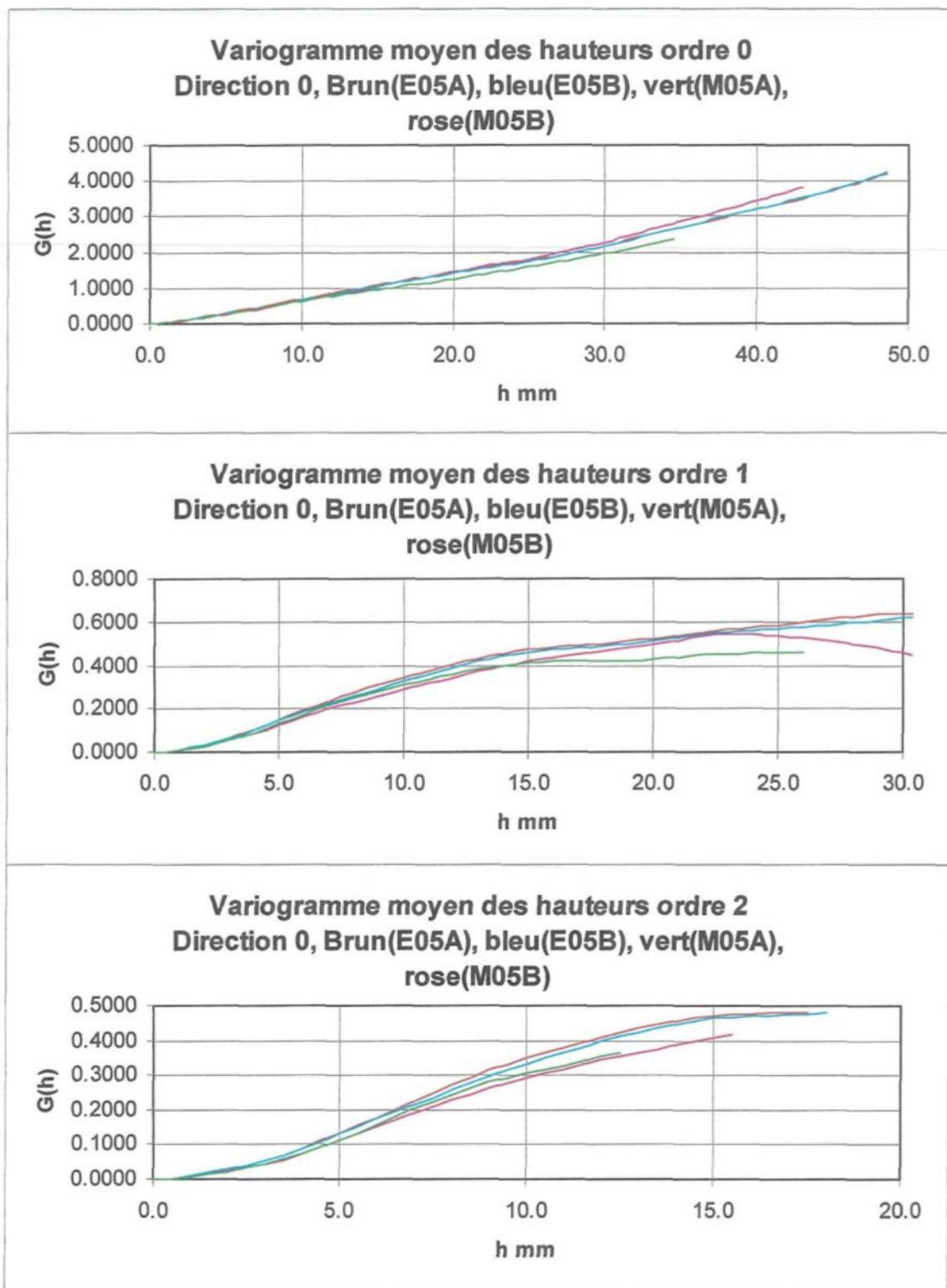
Essai 7, 5 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

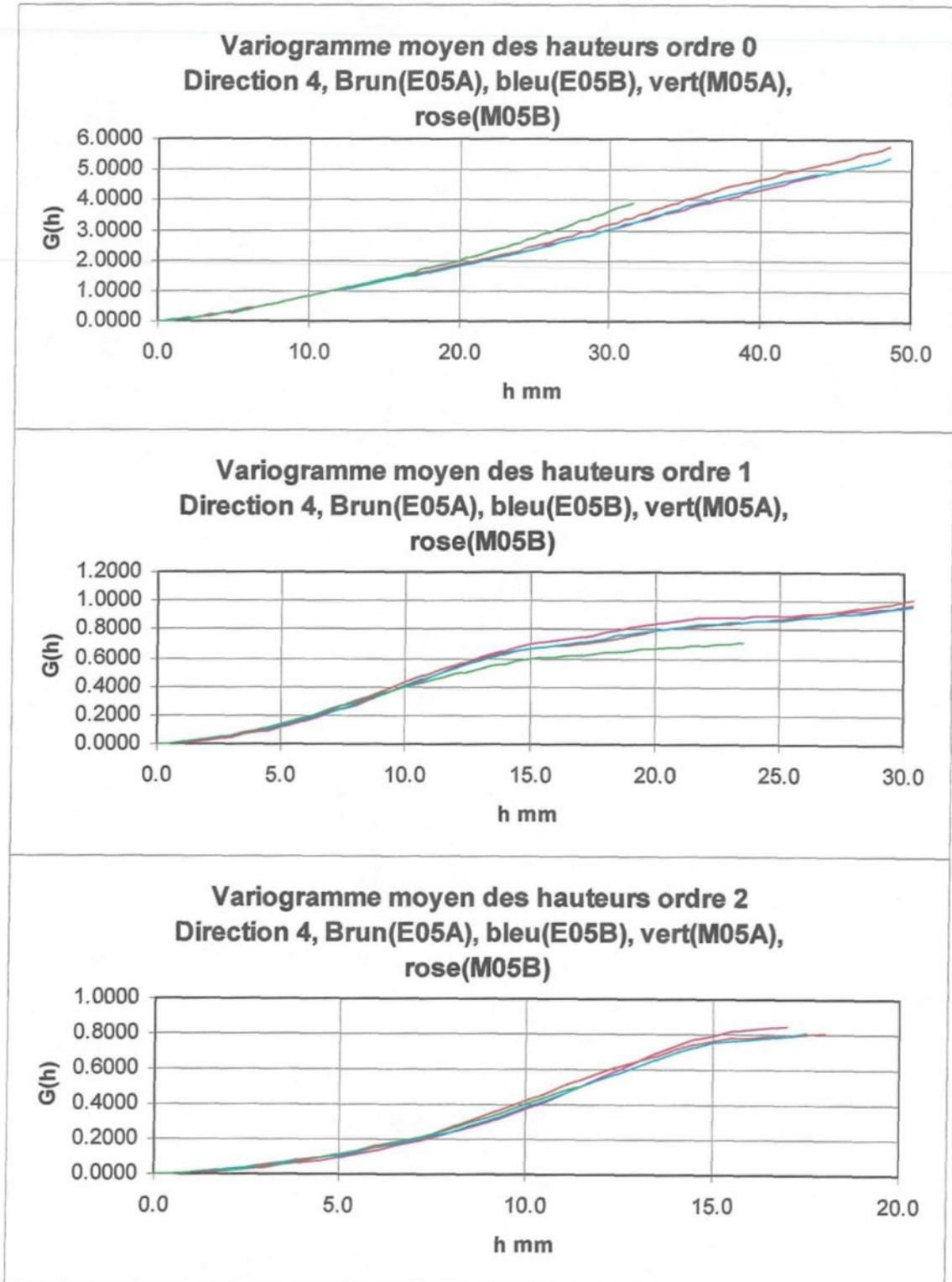


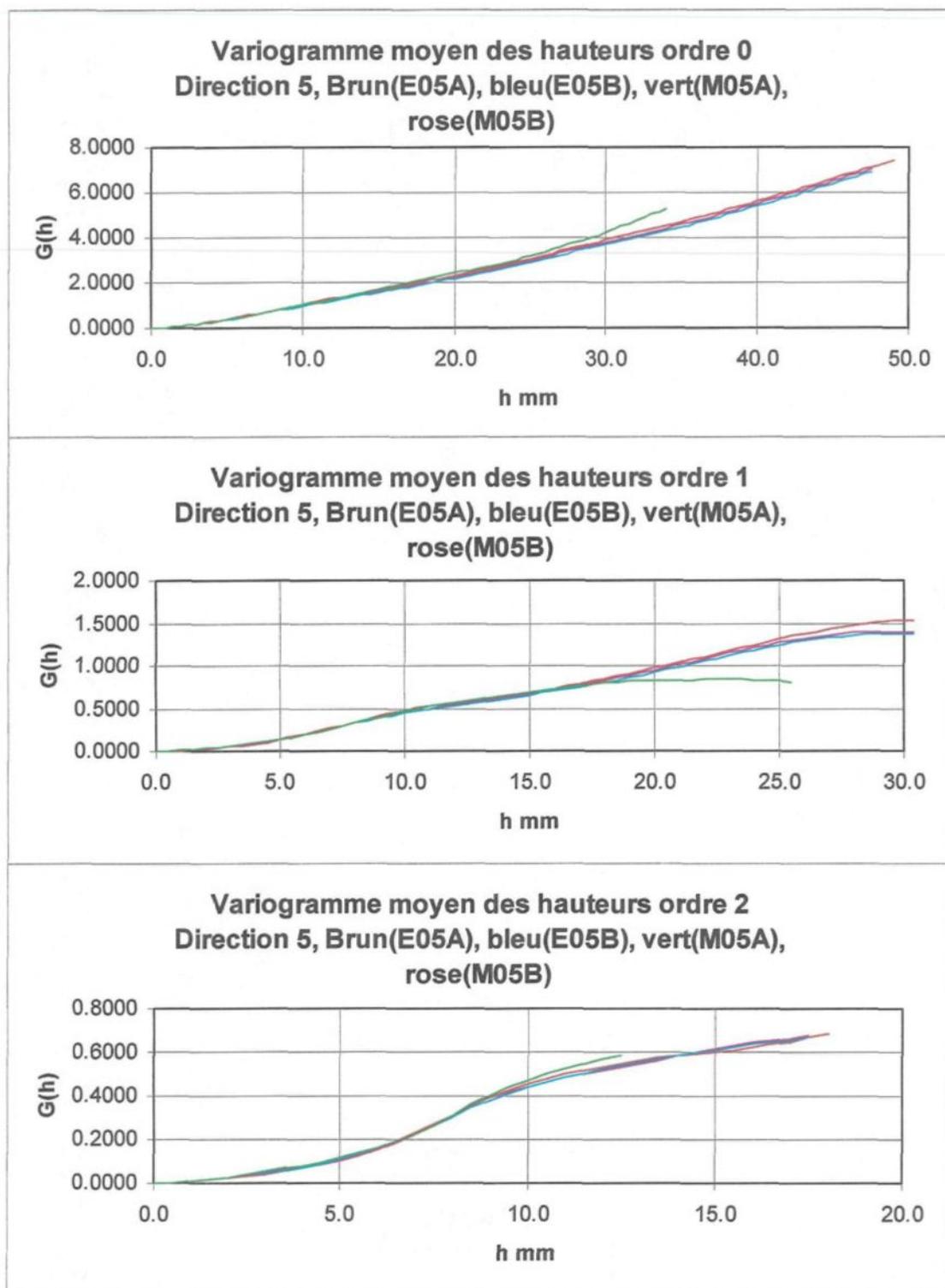


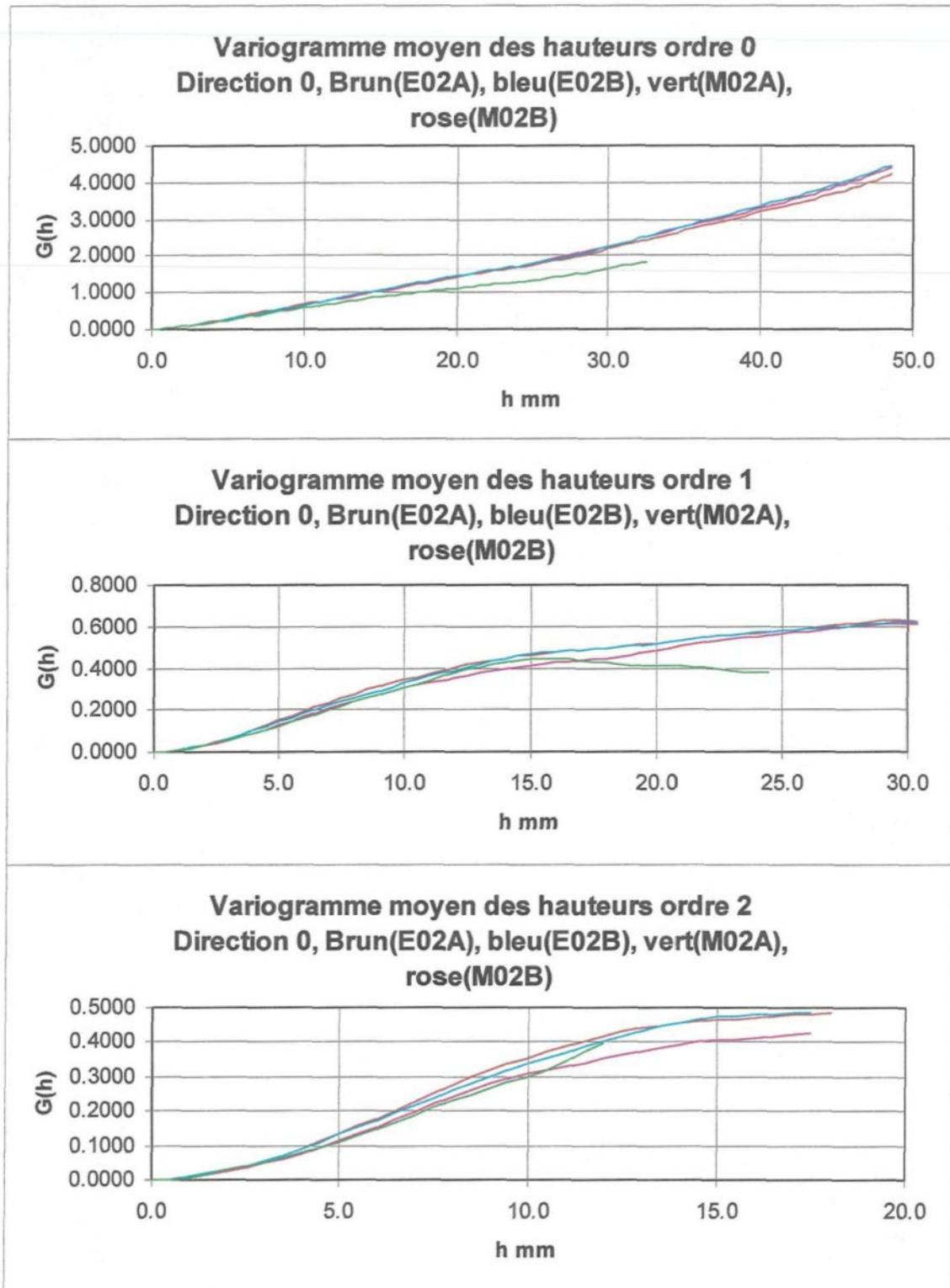




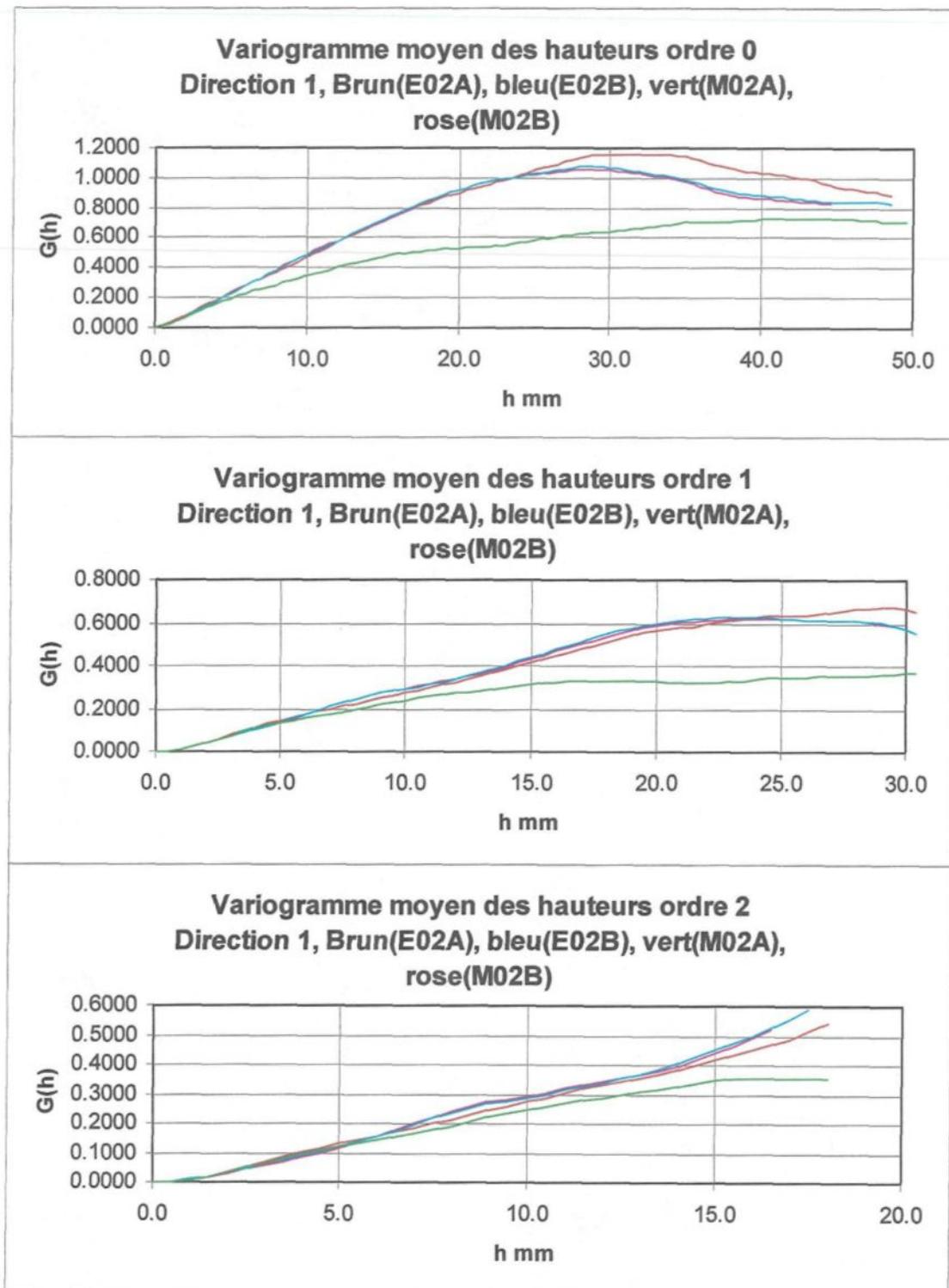


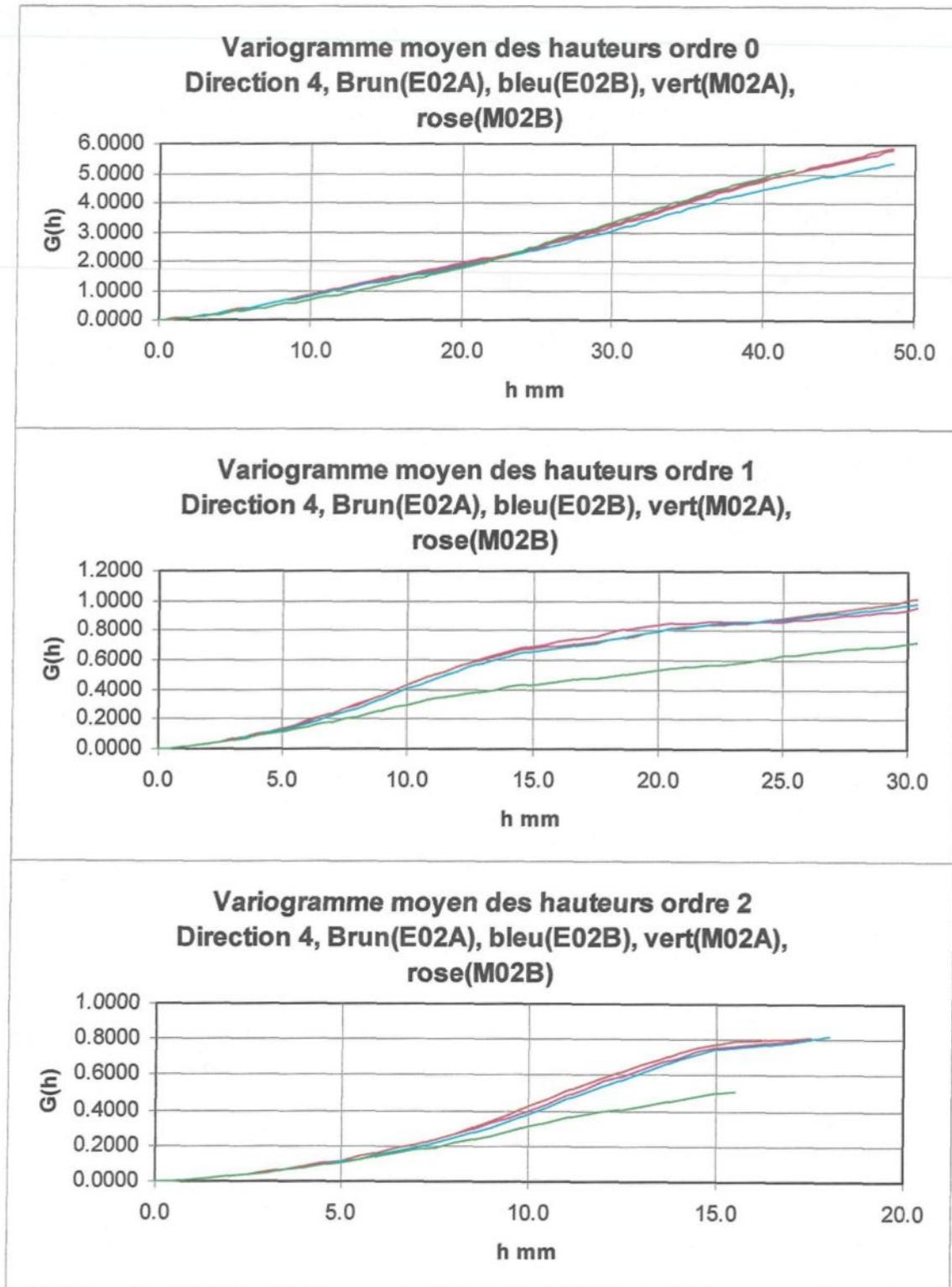


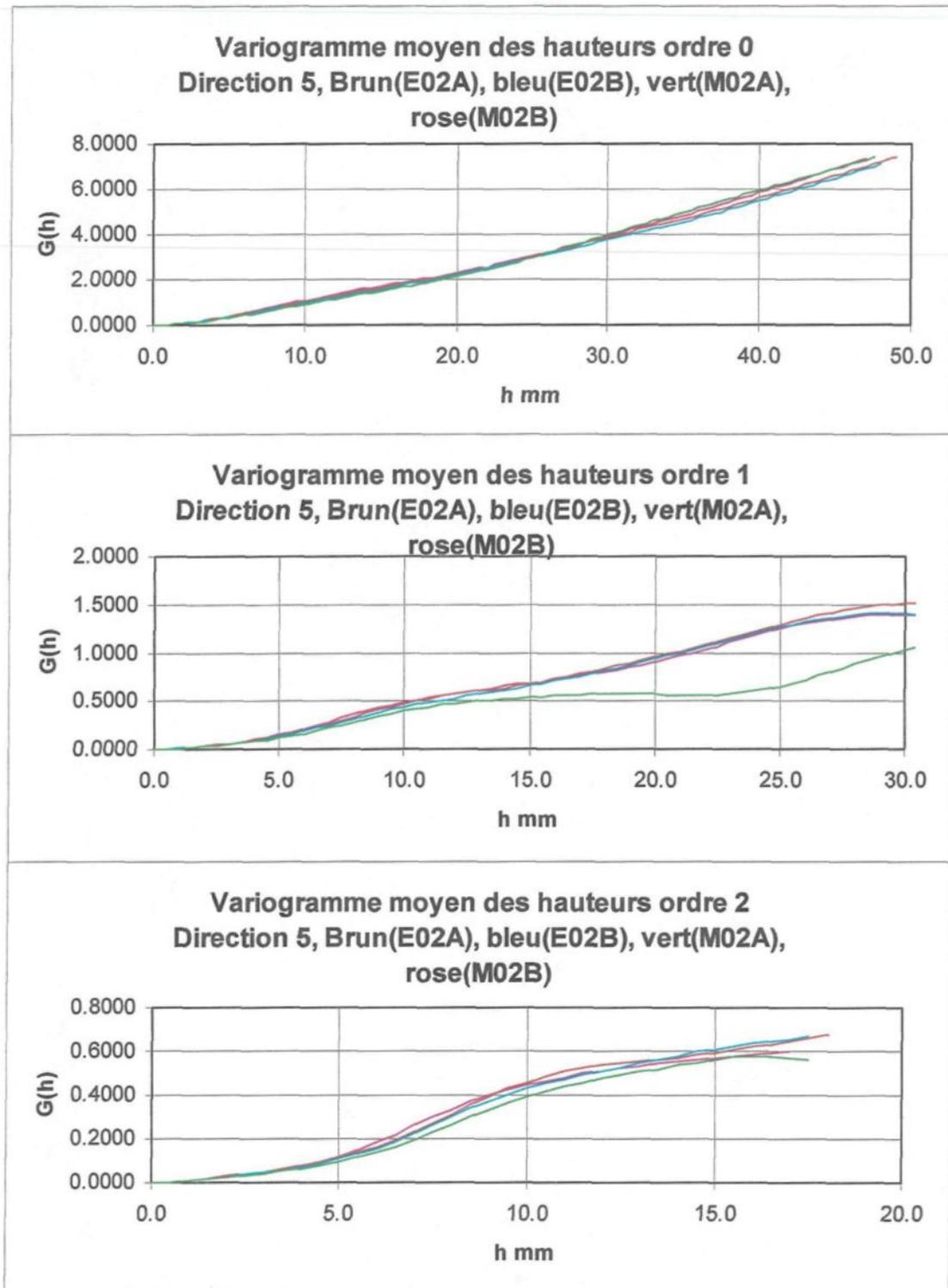


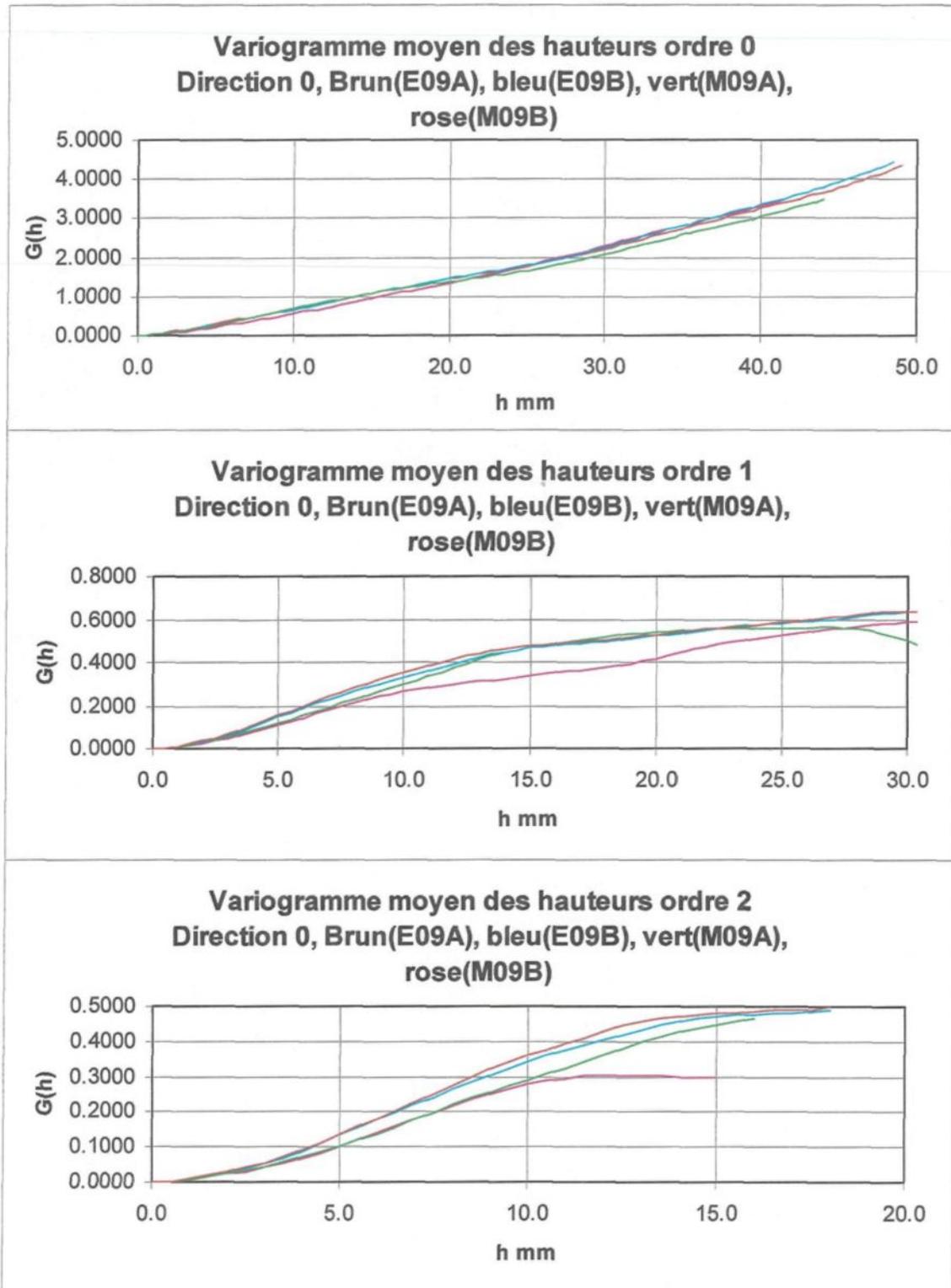


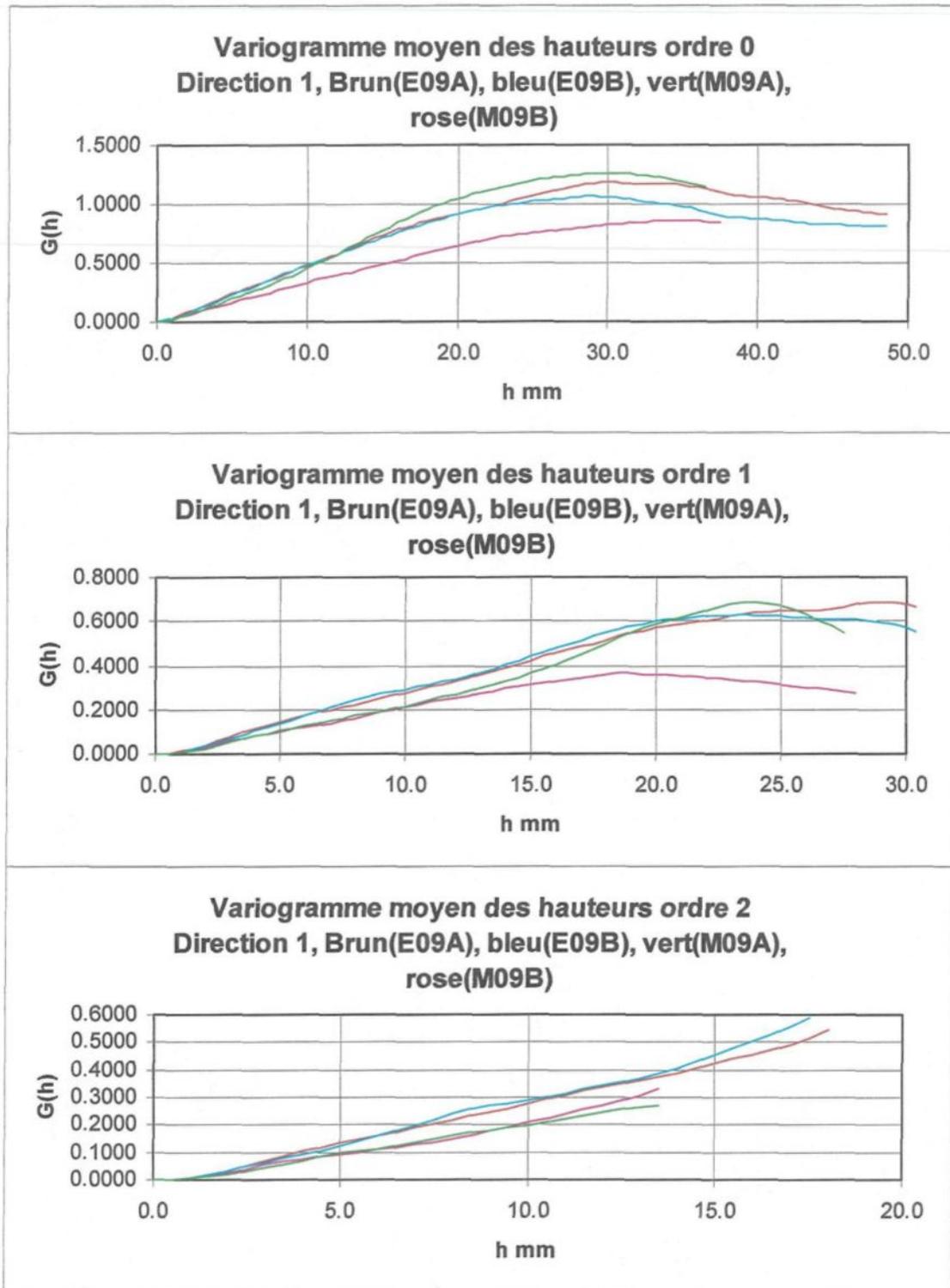
Essai 2, 7 Mpa, direction de cisaillement 5(90°)



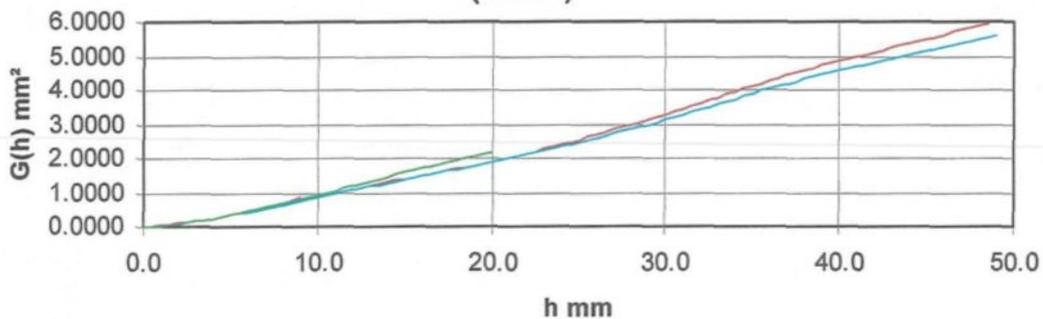




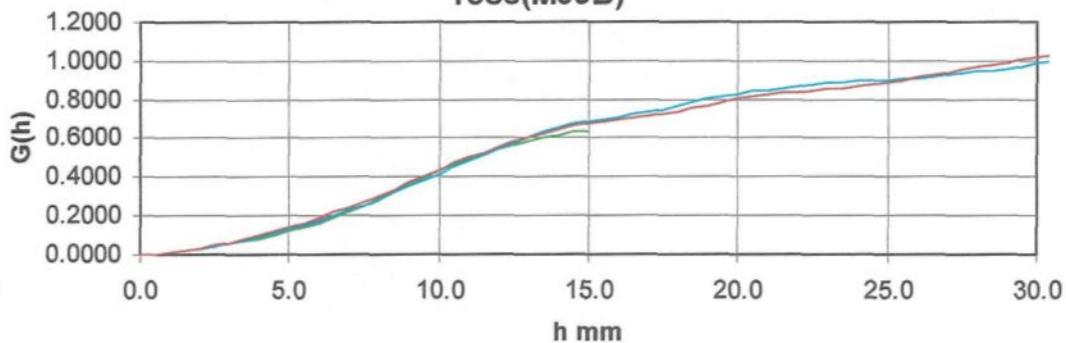




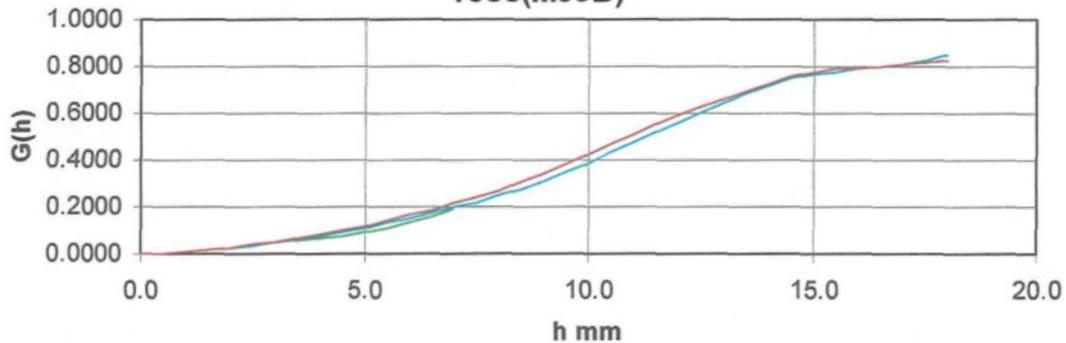
Variogramme moyen des hauteurs Ordre 0
Direction 4, Brun (E09A), bleu (E09B), vert (M09A), rose (M09B)



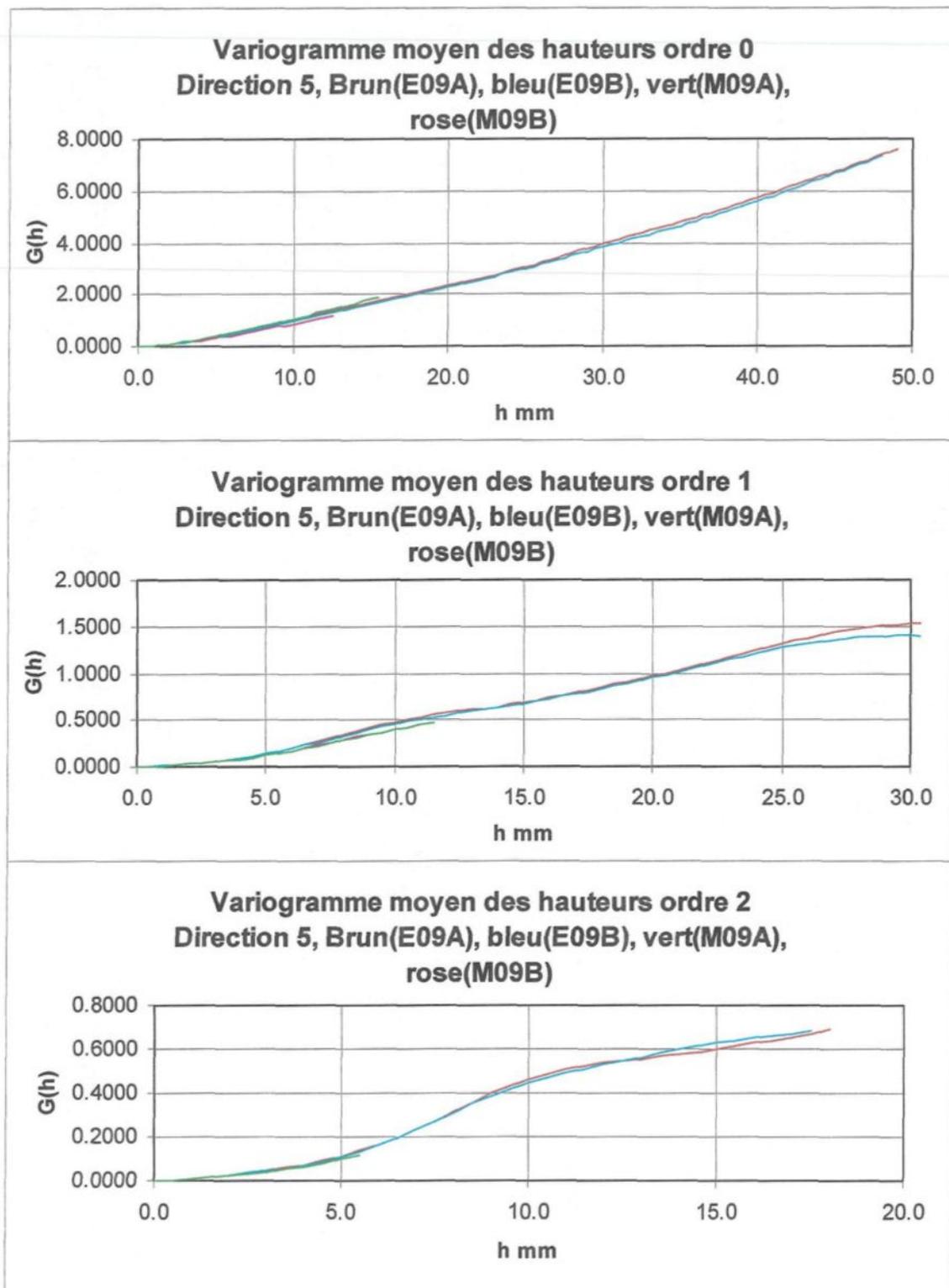
Variogramme moyen des hauteurs ordre 1
Direction 4, Brun(E09A), bleu(E09B), vert(M09A), rose(M09B)

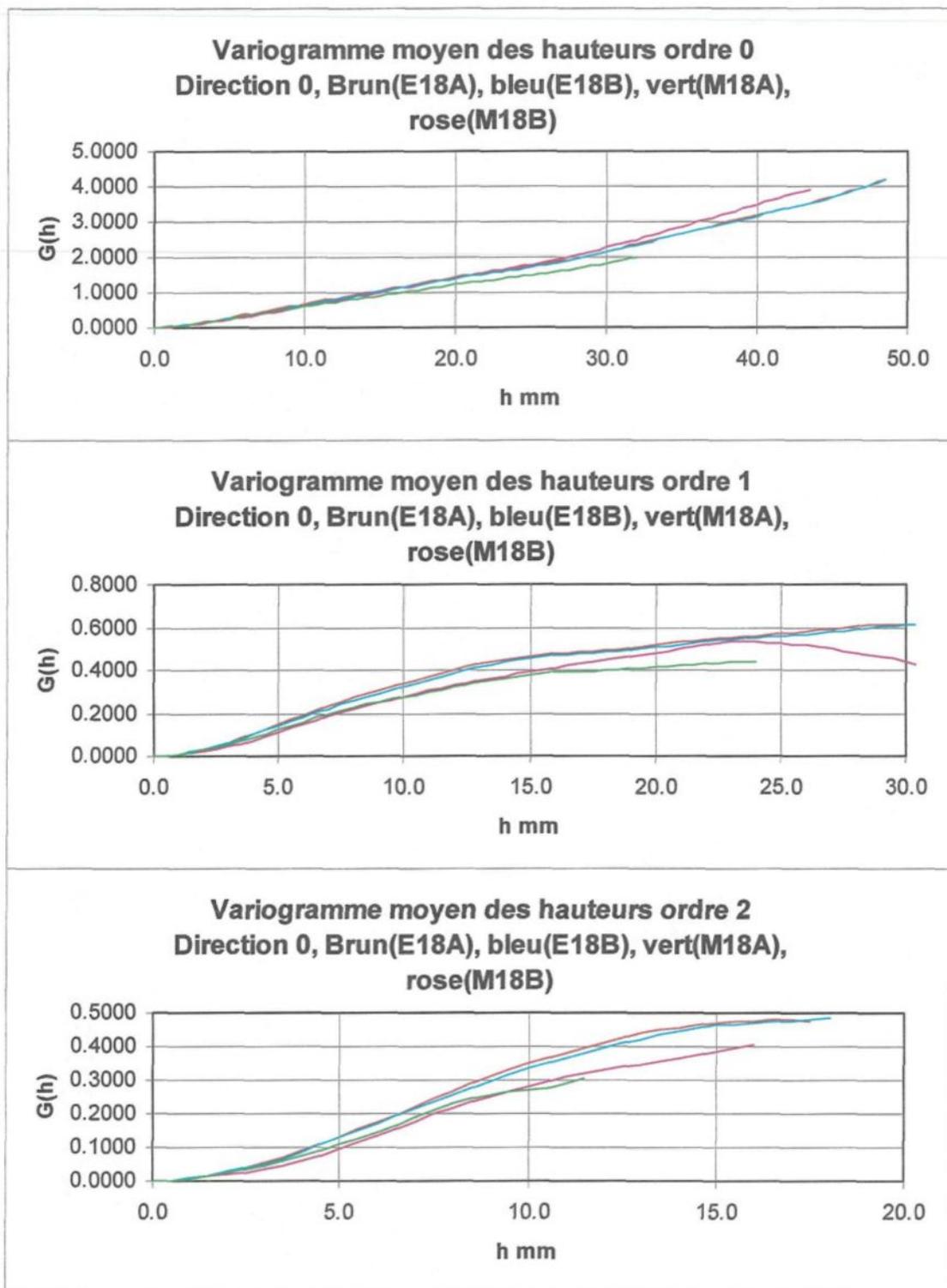


Variogramme moyen des hauteurs ordre 2
Direction 4, Brun(E09A), bleu(E09B), vert(M09A), rose(M09B)

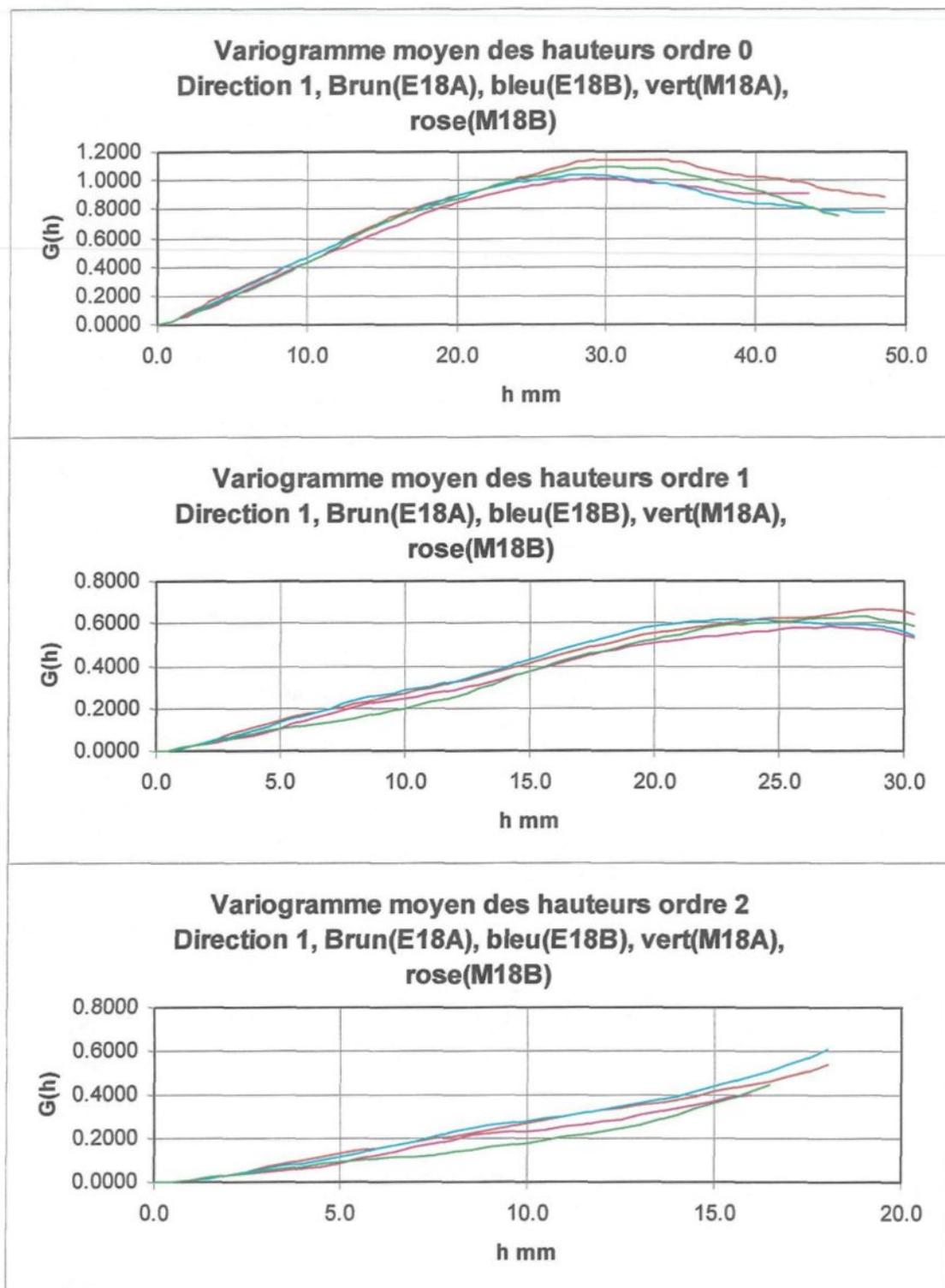


Essai 9, 7 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

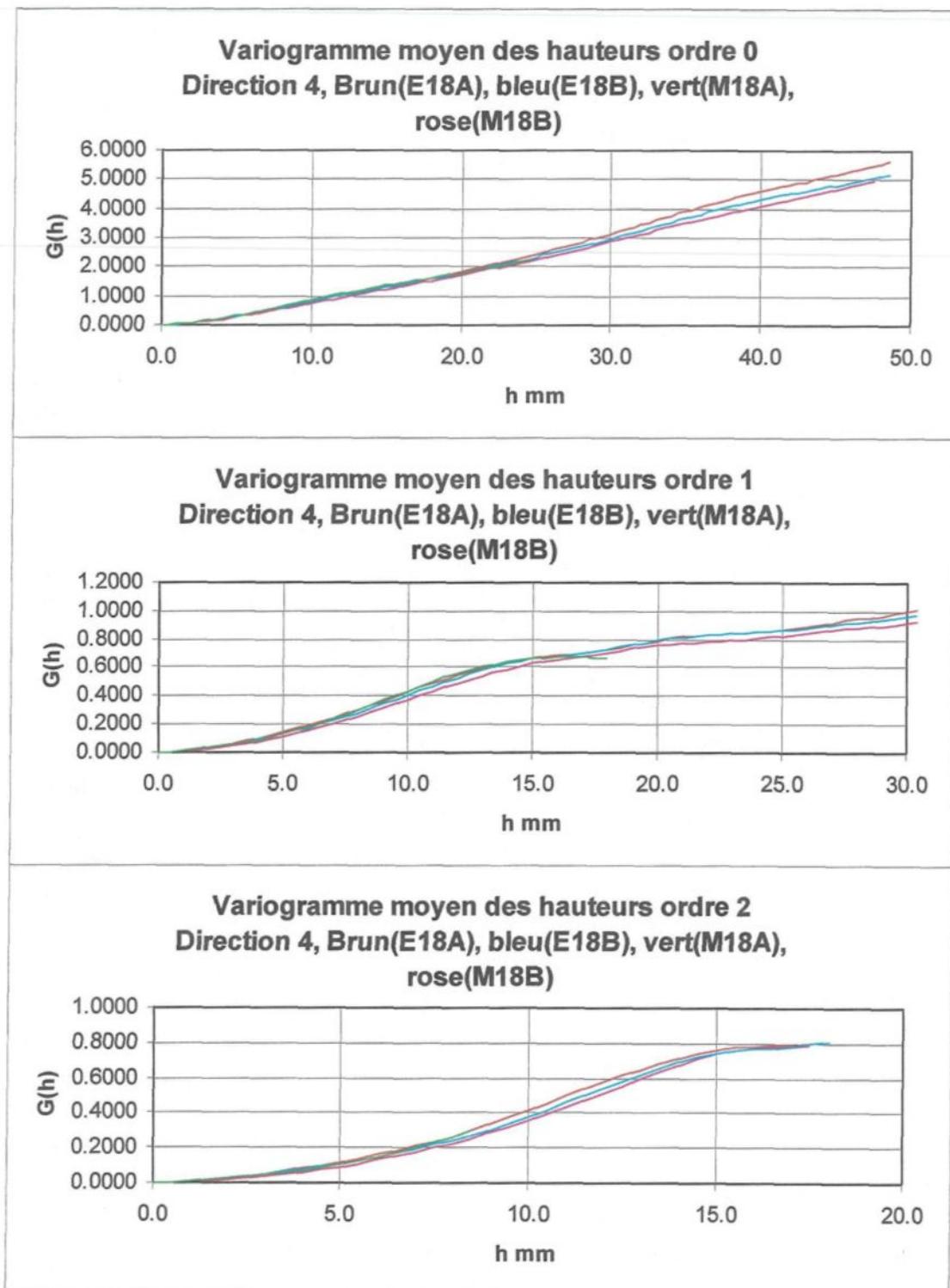


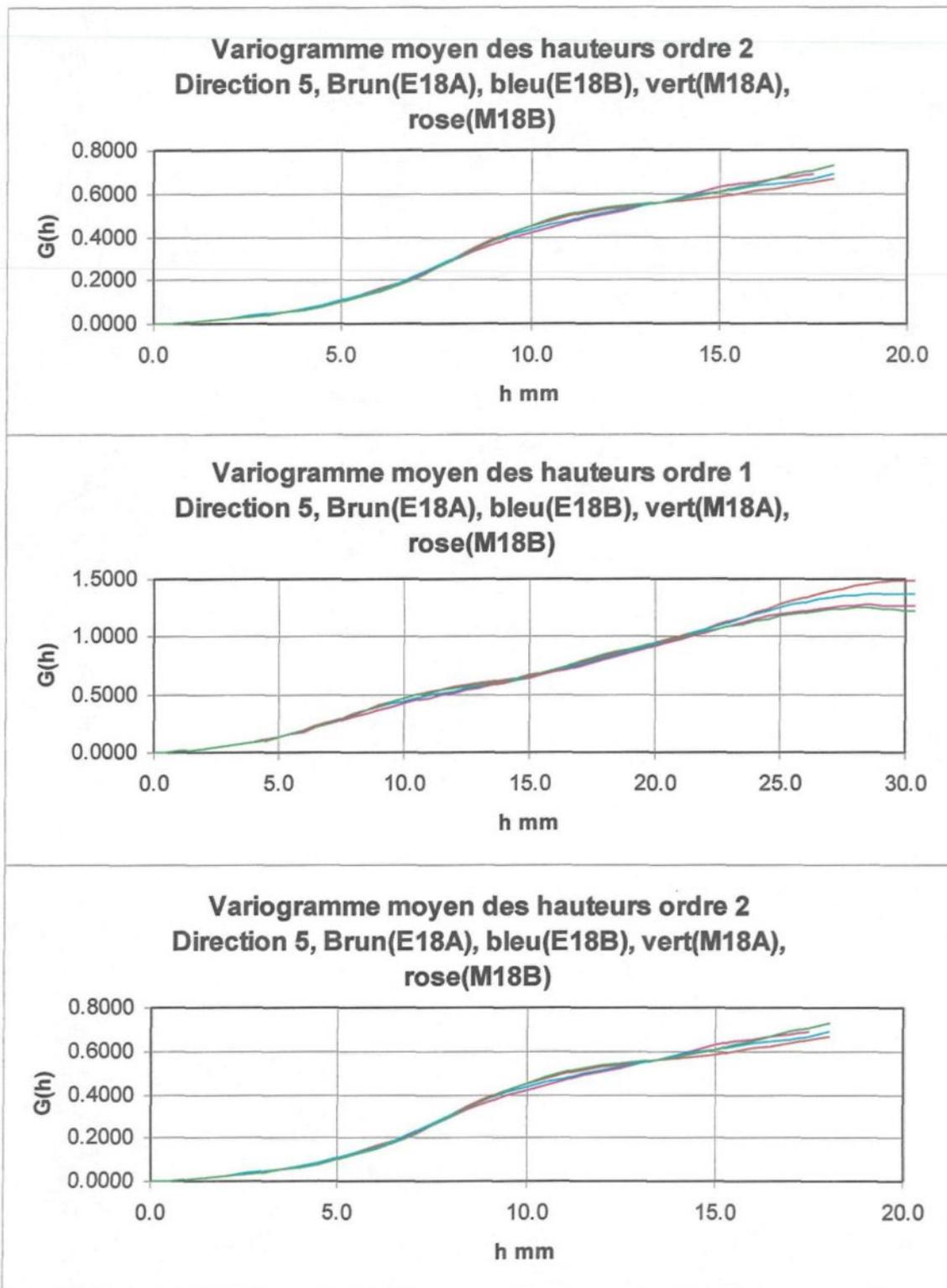


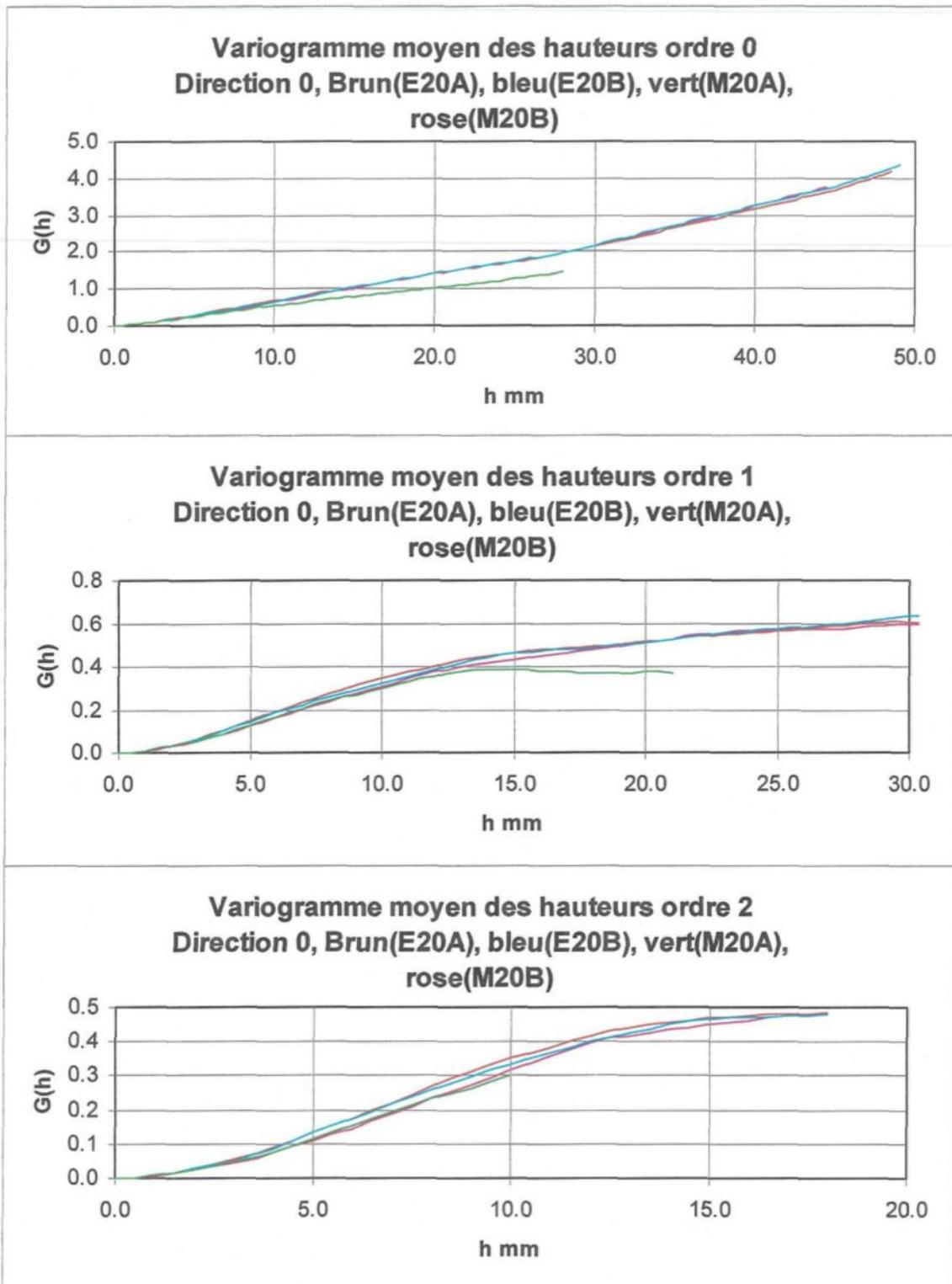
Essai 18, 9 Mpa, direction de cisaillement 1(0°)



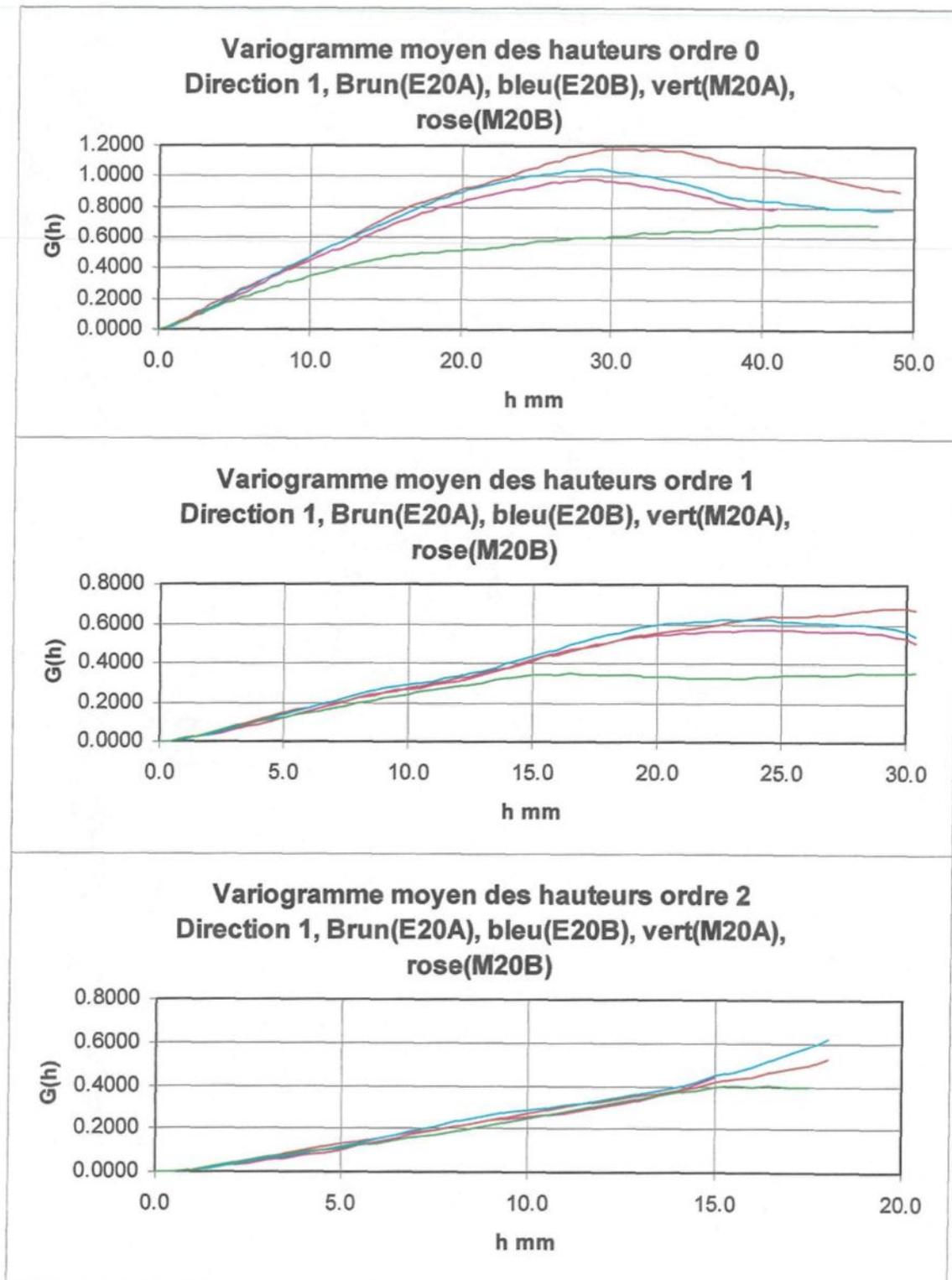
Essai 18, 9 Mpa, direction de cisaillement 1(0°)

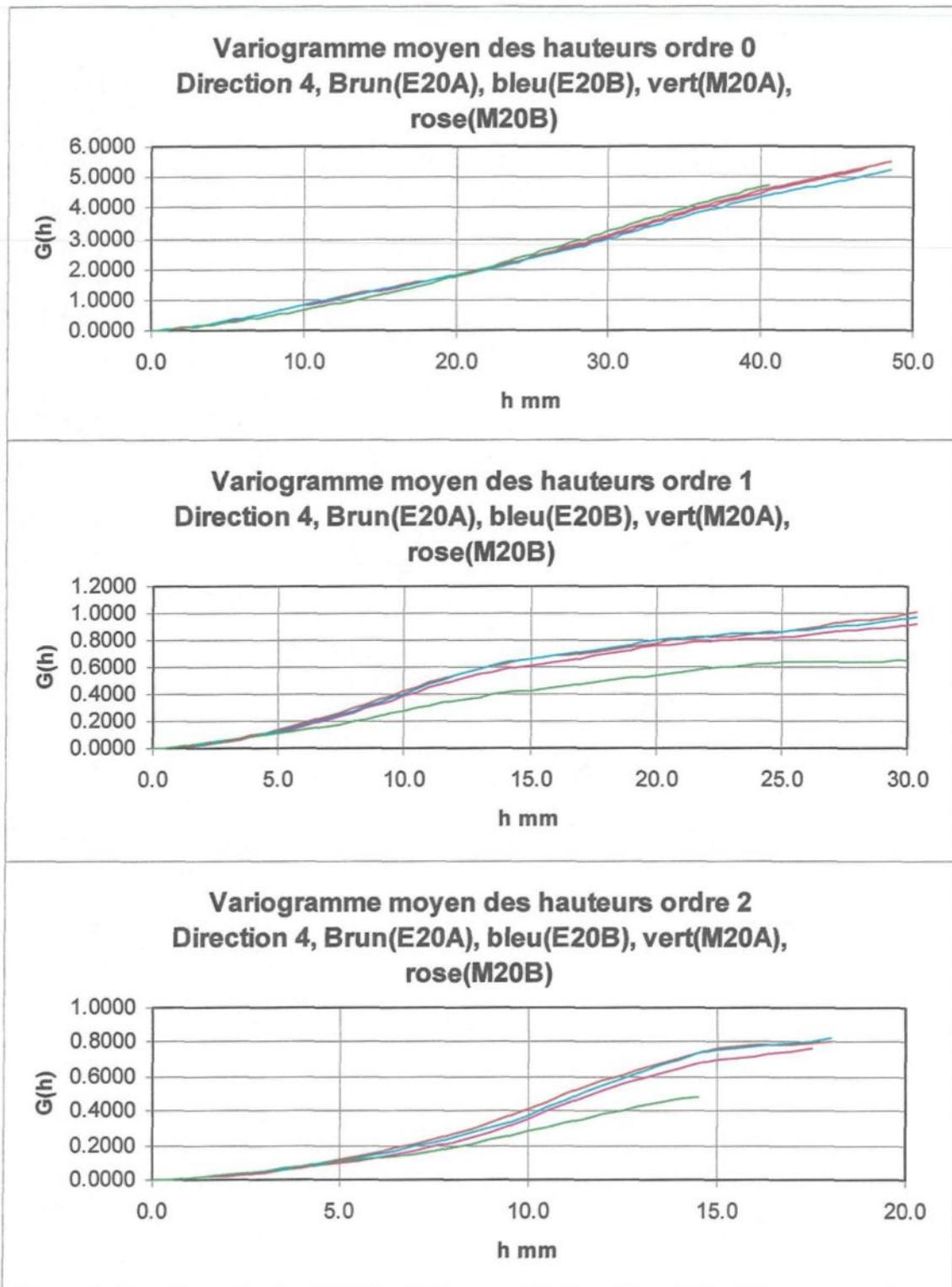


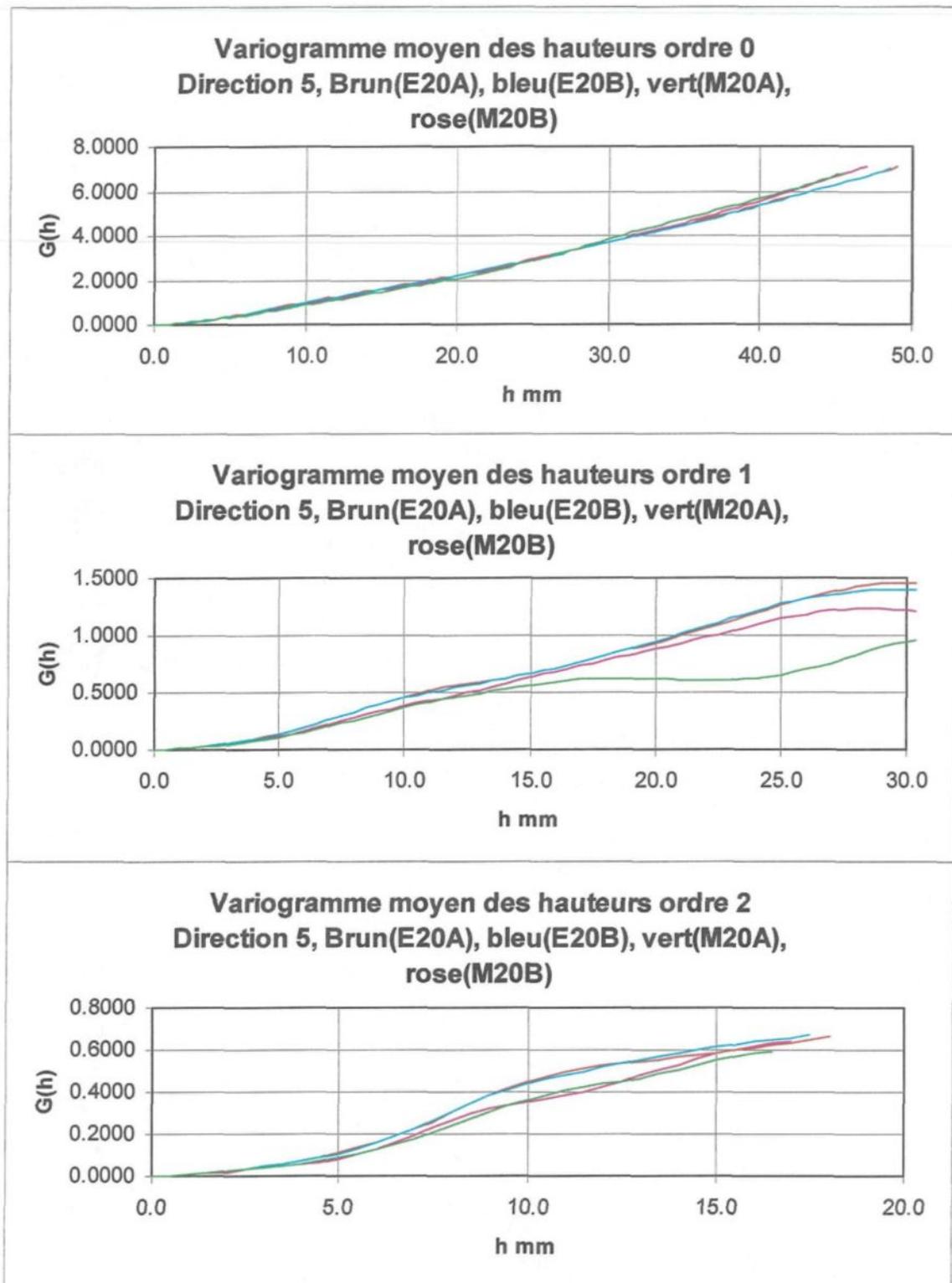




Essai 20, 9 Mpa, direction de cisaillement 5(90°)

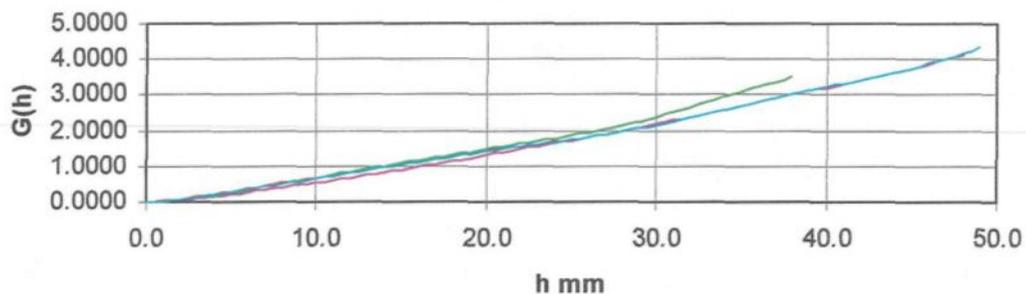




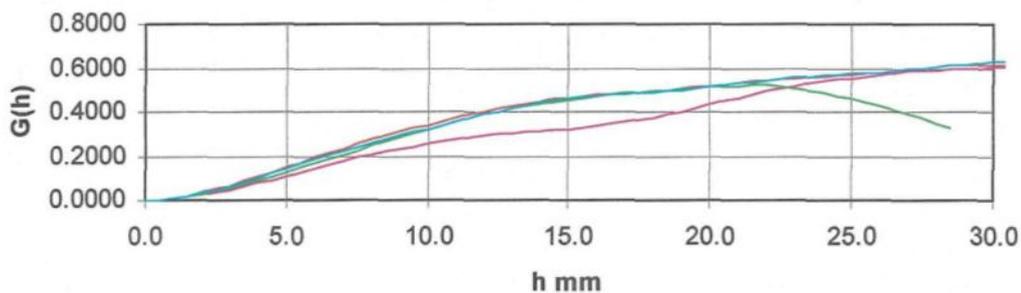


Essai 20, 9 Mpa, direction de cisaillement 5(90°)

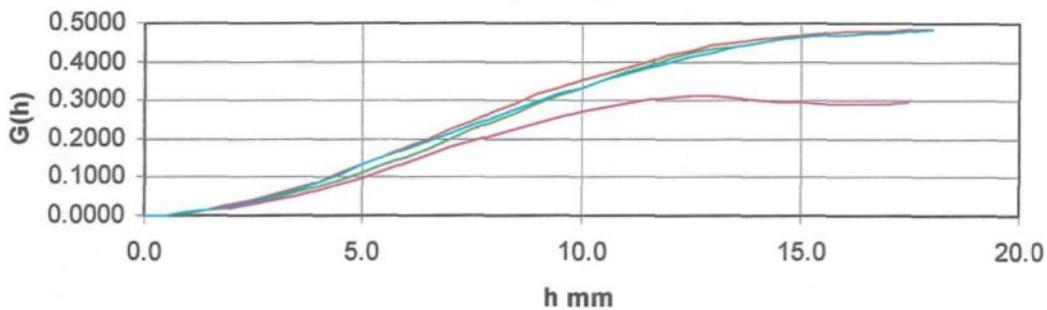
Variogramme moyen des hauteurs ordre 0
Direction 0, Brun(E19A), bleu(E19B), vert(M19A),
rose(M19B)



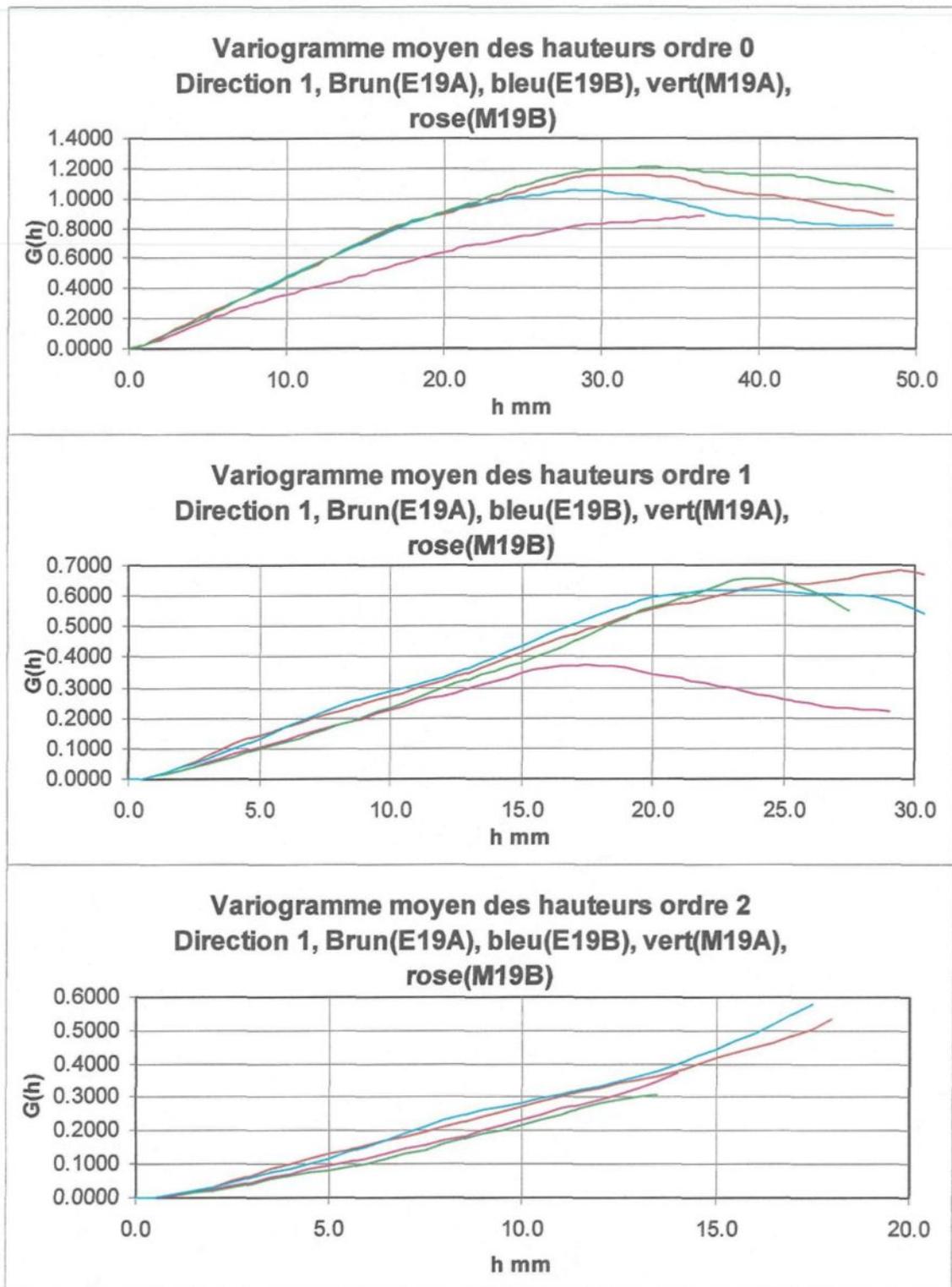
Variogramme moyen des hauteurs ordre 1
Direction 0, Brun(E19A), bleu(E19B), vert(M19A),
rose(M19B)



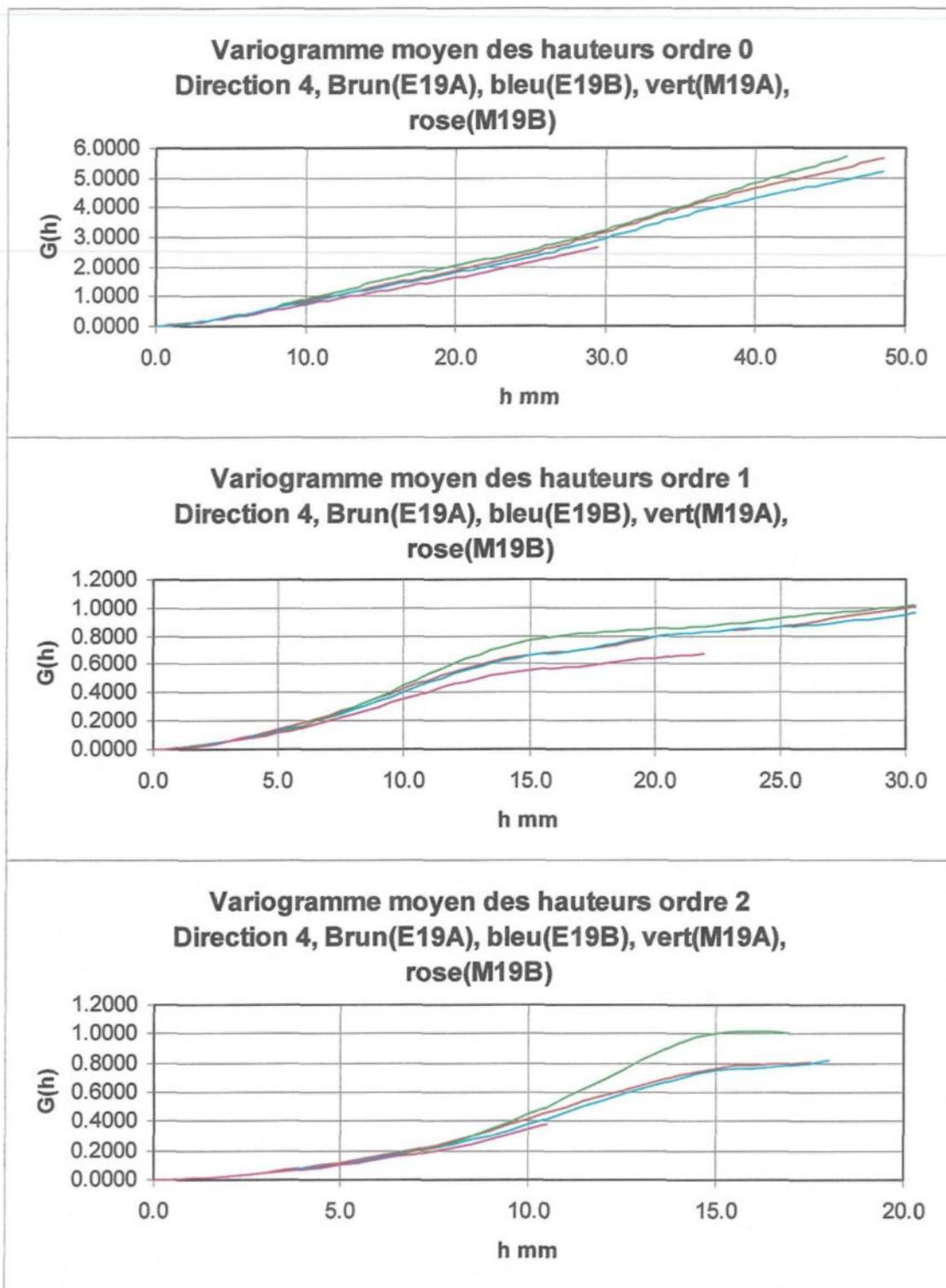
Variogramme moyen des hauteurs ordre 2
Direction 0, Brun(E19A), bleu(E19B), vert(M19A),
rose(M19B)

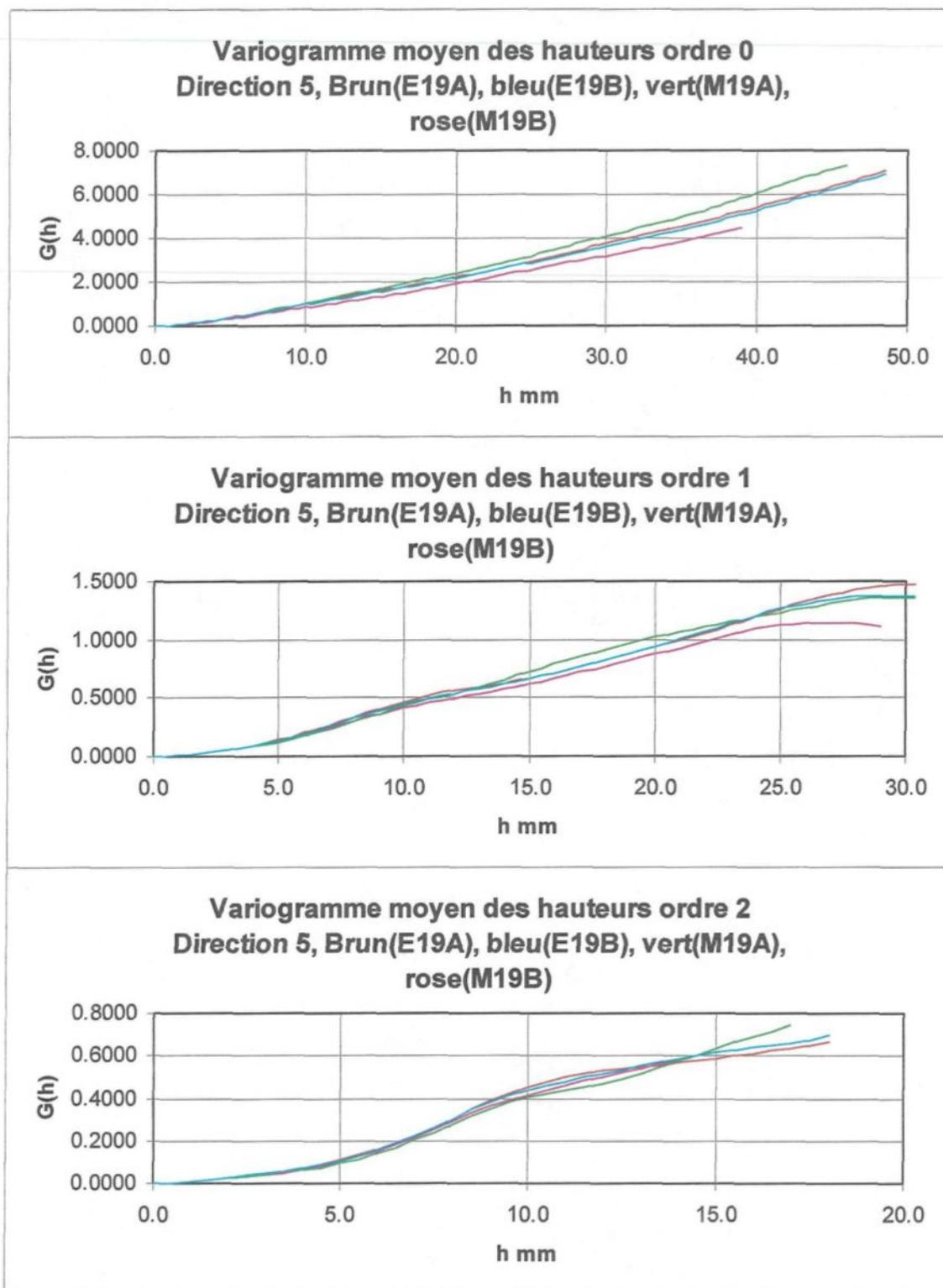


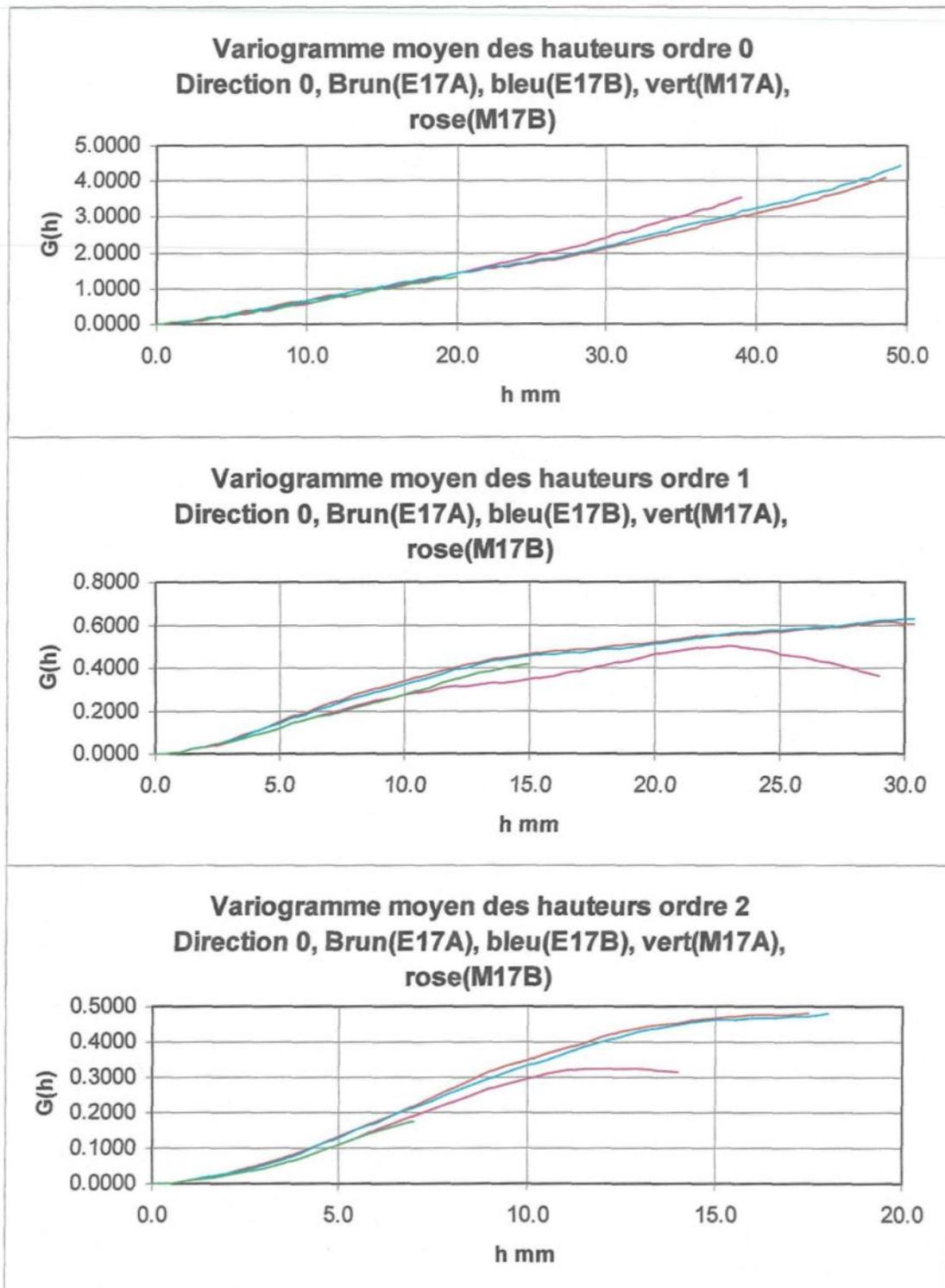
Essai 19, 9 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

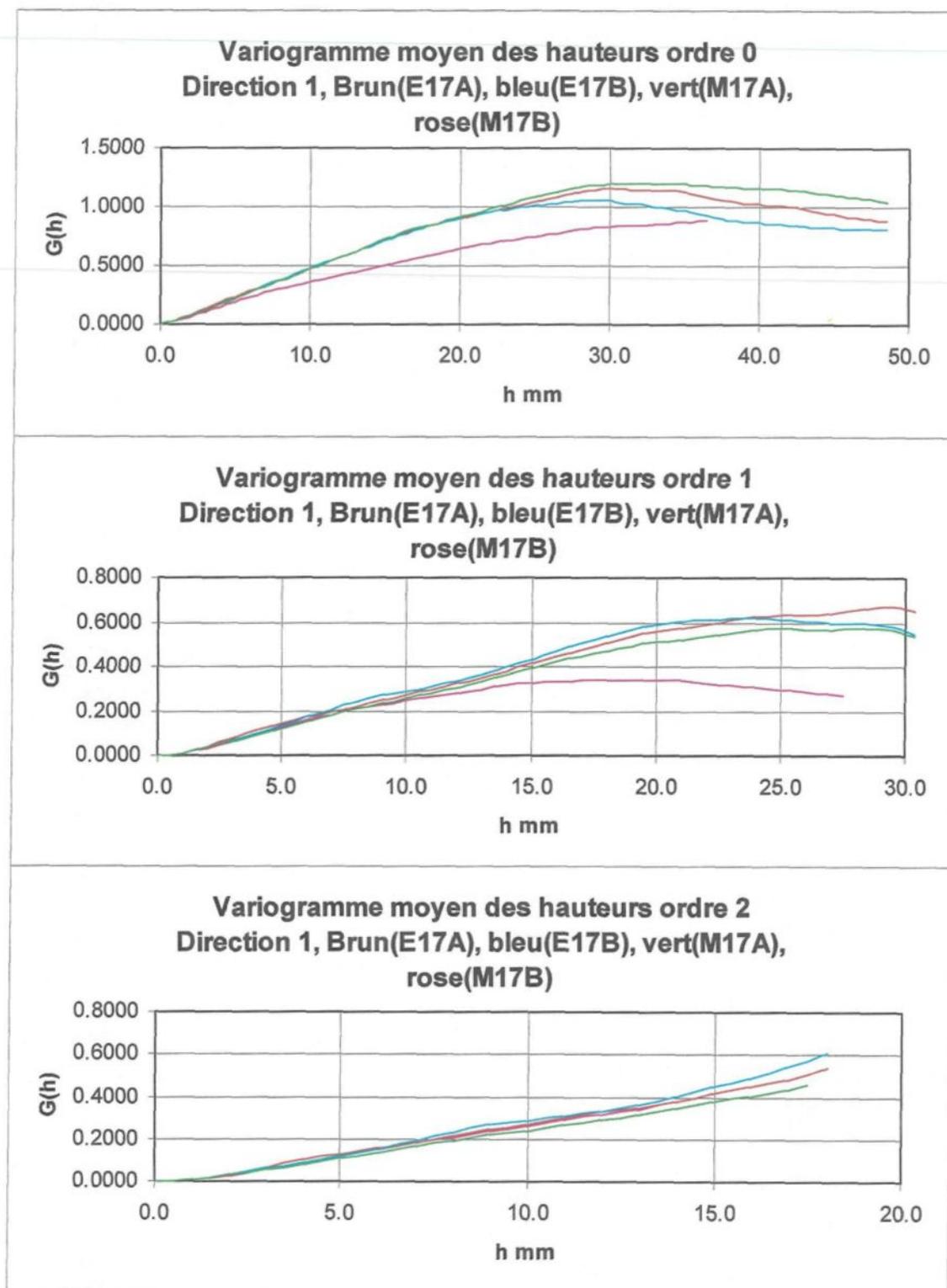


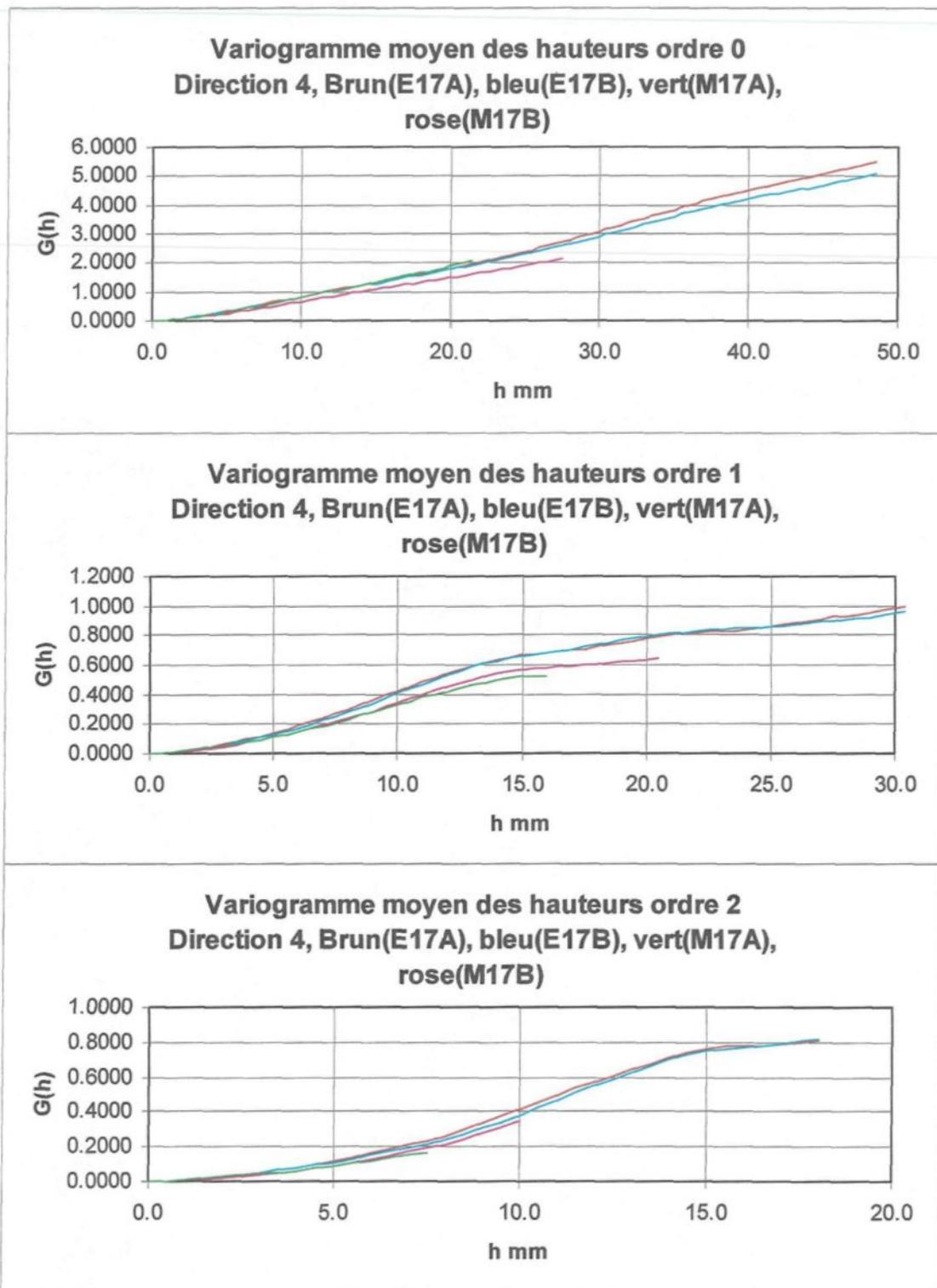
Essai 19, 9 Mpa, direction de cisaillement 3(180°)

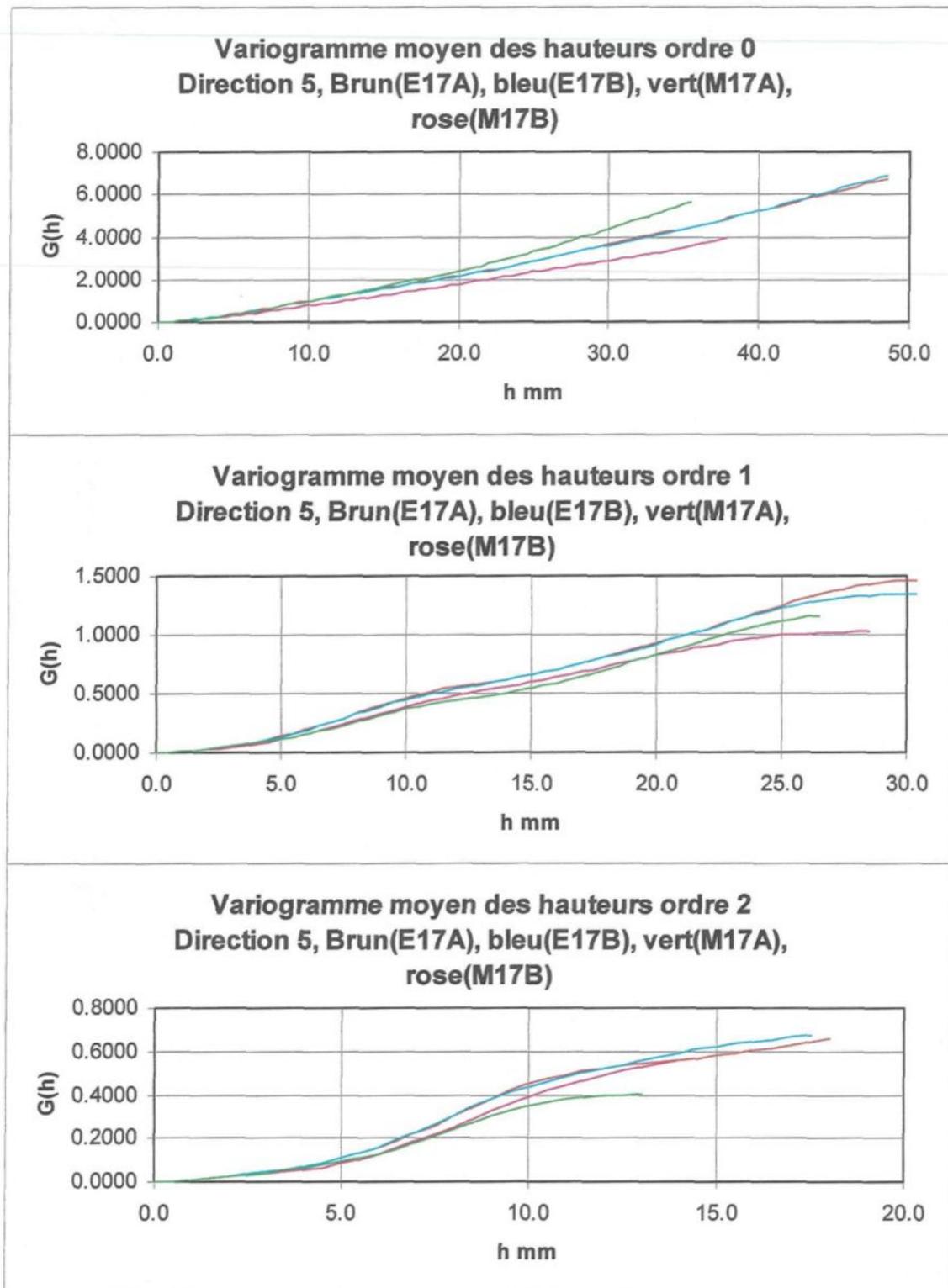












ANNEXE 12

ARTICLE CONFÉRENCE NEW-YORK

ANISOTROPY OF FLOW IN A FRACTURE UNDERGOING SHEAR AND ITS RELATIONSHIP TO THE DIRECTION OF SHEARING AND INJECTION PRESSURE

S. Gentier¹, E. Lamontagne², G. Archambault² and J. Riss³

¹ Research Division, BRGM,

B. P. 6009, 45060 Orléans cedex 2, France

² CERM, UQAC,

Bd de l'Université, Chicoutimi, G7H2B1, Québec, Canada

³ CDGA, Université Bordeaux I,

avenue des facultés, 33405 Talence cedex, France

ABSTRACT

The work presented deal with the effects of shear direction and injection flow rate on the directional anisotropy of the flow for a given normal stress. Also, is related to these effects the evolution of the intrinsic transmissivity of the fracture in relation to the shear direction and tangential displacements, particularly for small displacements. Tests are performed on mortar replicas of a natural fracture so that the fracture roughness and void space geometry are the same for each test. Three shear directions are defined. These tests results show that the evolution of the intrinsic transmissivity of a fracture depends on the shear direction particularly for small displacements (less than 0.5 mm), and that shearing induces noticeable modifications in flow direction.

KEYWORDS

Anisotropy, Flow pattern, Fluid flow, Injection pressure, Joints, Laboratory tests, Permeability, Shear behavior.

INTRODUCTION

In rock masses with low porosity, the flow is mainly located in the system of fractures that criss-crosses the rock mass. For a given stress state, the connectivity of fractures in the network and the permeability of each fracture, are the two important parameters characterizing the global hydraulic behavior of the rock mass. The permeability of each fracture is a function of the void geometry between the two fracture surfaces. Modification in the state of stress leads to a modification of the void geometry that results in a change in the permeability of the fracture. While the evolution of fractures permeability with the normal stress has been the subject of many studies, little research has been dedicated to the study of the evolution of the permeability of fractures under shear stress, even though this topic has been identified as an important problem in

understanding flow in relation with several field conditions. It is a particularly exceptional situation when a fracture in its natural setting is subject only to normal stress variation. In most of field configurations, the stress state includes a shear component. The prediction of the permeability of fractures under shear stresses, and understanding the effects of perturbations of the stress field inducing small shear displacements, are of the highest importance in engineering works (exploitation of oil reservoirs, underground storages, radioactive waste disposal, etc.).

Studies undertaken (Sharp and Maini, 1972; Gaie et al., 1990; Makurat et al., 1990; Olsson and Brown, 1993; Esaki et al., 1995) on the hydromechanical behavior of a fracture under shear conditions have defined the main factors influencing the fracture permeability in relationship to shear parameters : the total dilatancy and its rate of development, the morphology of the fracture surfaces and the geometry of the void space, the applied normal stress, the degree of initial closure (matched or mismatched), the gouge material, and the hydraulic and mechanical properties of the rock and joint. The relative importance of one of these factors remains to be evaluated. Moreover, none of these studies has addressed the problem of the flow anisotropy in relationship to the shear direction and the main phases of the joint shear behavior (mobilization of friction and dilatancy, peak shear strength, post-peak strain softening by degradation of asperities and residual shear behavior).

After undertaking a systematic study on the mechanics of a fracture shear behavior in relation to the shear direction, under constant normal stress and constant normal stiffness conditions (Flamand et al. (1994); Archambault et al. (1996); this symposium), another study was undertaken: this one focussed on hydromechanical shear behavior taking into account the influence of shear direction. Preliminary works carried out in the framework of this systematic study (Gentier et al., 1996) have demonstrated the feasibility of such tests, and the results obtained were very interesting, in particular, with regard to the relationship between the flow anisotropy in the fracture and the shear displacement. This feasibility study constitutes the basis of the work discussed in this paper. The experimental device has been modified to correct imperfections observed during the first phase of the study and the experimental procedure was also slightly modified. The objective of the test program is to demonstrate the role of the shear direction and injection flow rate, under a given normal stress, on the anisotropy of the flow in the fracture plane.

EXPERIMENTAL DEVICE

The experimental set-up consists of a classical shear machine device, a system of injection and a system of water recovery. The device is the same one used during the feasibility study (Gentier et al., 1996) with slight modifications. Fluid is recovered by eight sectors settled at the periphery of the joint. The recovery device consists of eight funnels which adapt their shape elastically during shear displacement. The location of the sectors is defined in relation to the shear direction (figure 2). Each sector pours in a vessel set on a plateau connected to a force captor. This device allows continuous measurement of the volume of fluid recovered in each sector. The conducted flow is radial divergent injection.

Samples used in this study are mortar replicas of a granite core sample containing a natural fracture at its midpoint. These samples are cylinders with a 120 mm diameter and are casted from replicas of the natural fracture already analyzed in the previous mechanical study (Archambault et al., 1996) and feasibility study (Gentier et al., 1996).

The test is piloted via a central electronic device that controls the pressure in the vertical jack, and determines the shear velocity rate during the test. The electronic device also controls the interruptions in shearing during which fluid is injected into the fracture. In addition to conventional mechanical measurements (pressure in the horizontal jack, pressure in the vertical jack, normal displacement, tangential displacement), measurements are also made of the inclination of the upper half-box and the hydraulic parameters : the pressure of injection, the rate of injection and the mass in each of the eight recovery sectors.

The procedure followed for these tests consists, of the set-up of the sample, the saturation of whole the entire system, and settlement of the fracture by means of several loading-unloading cycles. The application of the normal stress is followed by several injections of fluid under a constant flow rate. Then, for each defined shear displacement, several injections of fluid are made under a constant flow rate. The results presented here are for three shear directions (test 3 : 90°, test 4 : 180° and test 5 : 270°), (figure 2). The applied normal stress was 7 MPa for the all three tests. The shear velocity was 0.5 mm/min. For each of the shear steps imposed, injections were made at three rates : 200 cm³/h, 500 cm³/h and 1650 cm³/h.

MECHANICAL BEHAVIOR

The observed shear behavior was similar for all three of the chosen shear directions for a constant normal stress of 7 MPa (figure 1). The three tests show a closure phase between 0.180 and 0.250 mm of shear displacement whose magnitude does not exceed twenty microns. Thereafter, dilatancy is initiated and dominates ($\alpha_{\max} = 14$ to 16°). The peak shear stress appears at 0.246 mm of shear displacement for a shear direction of 90°, at 0.263 mm for the direction of 180° (shearing in the perpendicular direction to the previous one) and at 0.393 mm for the direction of 270° (shearing in the opposite sense of the 90° one). An increase of tangential displacement is accompanied by a net increase in the peak shear strength (6.3 MPa in the direction 90° and 8.5 MPa in the two other directions). A phase of residual shear behavior appears between 2 and 2.5 mm of shear displacement for the three directions analyzed. However, the dilatancy becomes really almost negligible only after 2.5 mm of displacement in the 180° direction and 4 mm in the 90° direction, while it does not seem to disappear in the 270° direction. In this last direction, the dilatancy for large shear displacements can be simply understood as an inclination of the mean shear plane. The anisotropy in shear behavior with regard to the three directions tested appears mainly in the peak shear stress and pre-peak phase. In contrast, the dilatancy involved in the very beginning of shearing does not really differ from one direction to the other.

GLOBAL HYDRAULIC BEHAVIOR

Global intrinsic transmissivity (figure 2), decreases (by an order of magnitude) in the first phase of closure of the joint. This phenomenon is particularly noticeable in tests 4 and 5 for which the shear steps are sufficiently close to one another. On the other hand, it is not visible in test 3 because the first shear step chosen is greater than the tangential displacement corresponding to this phase. After the closure phase, dilatancy is involved and it induces a small increase of intrinsic transmissivity until the peak is reached. After the peak, during the softening phase that is attributed to the degradation of asperities, intrinsic transmissivity increases substantially (approximately two to three orders of magnitude) and then stabilizes. The transmissivity in the 90° direction is slightly greater than the transmissivity in the two other directions for shear displacements larger than 0.6 mm. Values greater than this distance should only be considered indicative because of imprecisions in measurements in the range of pressures associated with large shear displacements. For this fracture, the anisotropy does not seem to play an important role in determining the magnitude values of the intrinsic transmissivity corresponding to each phase, but does seem to be related to the tangential displacement corresponding to variations in transmissivity.

DIRECTIONAL ANALYSIS OF THE RECOVERY

The evolution of hydraulic behavior for the 90° direction (figure 3), during shear progresses as follows :

- The evolution of the recovery pattern during the pre-peak phase is visibly influenced by the closure of the fracture which produces an increase in fluid recovery in some sectors and a decrease in others. The effects of dilatancy and closure as such, are difficult to identify due to the fact that the only hydraulic measurements are taken just at the transition point for both. During this phase, the recovery pattern shows a trend towards reorientation in a direction perpendicular to the shear direction.

- The recovery pattern is modified when passing through the peak shear stress for the three flow rates considered. After peak, the recovery pattern shows that the main recovery is in a direction subperpendicular to the shear direction.

After peak, the evolution of the recovery patterns is more complex and depends on the flow rate :

- The reduction in dilatancy ($15^\circ \rightarrow 8^\circ$) for 1 mm of shear displacement causes a modification in the recovery pattern for the rates of 500 and 1630 cm^3/h . This pattern is maintained until 1.5 mm of shear displacement and is likely related to with the beginning of residual shear behavior. The orientation of the main recovery remains in the same direction. For larger displacements, the hydraulic information is not considered valid because of leakages observed in the device.

- For the rate of 200 cm^3/h , a modification in the recovery pattern occurs from 0.772 mm of shear displacement and shows a second change at 1.5 mm.

The evolution of the hydraulic behavior for the 180° direction (figure 4), during shear progresses as follows :

- The evolution of the recovery pattern during the pre-peak phase is visibly influenced by the closure phase similarly to the previous test, as evidenced by an increase in fluid recovery in certain sectors and a decrease in others. The effect of dilatancy is more difficult to identify as such due to its very short duration.

- The recovery pattern is modified when passing through peak shear stress for the three flow rates considered. This modification occurs from 0.227 mm for a rate of 200 cm^3/h while it occurs only from 0.321 mm for the two other rates. For the rate of 500 cm^3/h , the transition is more progressive with the appearance of an intermediate recovery pattern at 0.321 mm. After peak, the main recovery direction tends to be oriented subperpendicularly to the shear direction. However, the recovery direction parallel to shear direction remains a direction of recovery in particular for the rate of 200 cm^3/h .

After peak, the evolution of the recovery patterns is more complex and depends on the flow rate considered :

- The reduction in dilatancy rate ($16^\circ \rightarrow 10^\circ$) does not cause any modification of the recovery pattern for rates of 200 and 1630 cm^3/h . However, it can be associated with the intermediate pattern for the rate of 500 cm^3/h pointed out previously.

- The reduction in dilatancy rate at 1.3 mm of tangential displacement ($10^\circ \rightarrow 5^\circ$) causes a noticeable modification of the recovery pattern for rates of 200 cm^3/h and 500 cm^3/h . On the other hand, the modification is far lower than for the rate of 1630 cm^3/h with a trend to isotropy. This last change is in relationship with the appearance of residual shear behavior.

- The last reduction in dilatancy rate larger than 2.5 mm of tangential displacement ($5^\circ \rightarrow 1^\circ$) does not modify the recovery pattern for a rate of 200 cm^3/h that remains strongly anisotropic. On the other hand, this reduction modifies the recovery pattern for the rate of 500 cm^3/h by changing the main recovery direction. For the rate of 1630 cm^3/h , the recovery pattern becomes strongly isotropic.

The evolution of the hydraulic behavior for the 270° direction (figure 5), during shear progresses as follows :

- The evolution of the recovery pattern during the pre-peak phase is visibly influenced by the closure then dilatancy that results in the increase in fluid recovery in certain sectors and a decrease in others. Going through the closure phase to the dilatancy one does not provoke any modification in the recovery pattern for the rate of 200 cm^3/h , but it is clearly marked for rates of 500 cm^3/h and 1630 cm^3/h .

- The recovery pattern is modified when passing through peak for the three rates considered. After peak, the recovery pattern shows a dominant orientation of the recovery in a direction subperpendicular to the shear direction.

After peak, the evolution of recovery patterns is more complex and depends on the rate considered :

- For the rate of 200 cm^3/h , the reduction in dilatancy rate ($14^\circ \rightarrow 9^\circ$) provokes a light modification in the recovery pattern for a shear displacement of around 1.4 mm. It is modified again from 2.5 mm with a particular reorientation of the dominant recovery in a direction subparallel to shear direction. This last modification is without doubt in relation with the appearance of the residual behavior.

- For the rate of 500 cm^3/h , the reduction in dilatancy ($14^\circ \rightarrow 9^\circ$) causes a light modification in the recovery pattern too but only from 2 mm of shear displacement. Similarly, the modification in the recovery pattern in connection with the appearance of the residual shear behavior occurs only from 3 mm. Except this small offset, observed trends are the same.

- For the rate of 1630 cm³/h, the reduction in dilatancy rate ($14^\circ \rightarrow 9^\circ$) does not cause noticeable modification in the recovery pattern. On the other hand, the modification in the recovery pattern in relationship with the appearance of the residual shear behavior is well marked from 2.5 mm with a trend to a greater isotropy.

DISCUSSION

The values of intrinsic transmissivity before shearing for the three common rates (200 cm³/h, 500 cm³/h and 1630 cm³/h) used in the three tests 3, 4 and 5, vary from $7.6 \cdot 10^{-10}$ to $3.2 \cdot 10^{-9}$ cm³. These values are close enough of to each other for the three rates to be considered very similar. However, initial recovery patterns (before shear) show variations from one test to another. Part of this variation may be due to set-up problems : the initial matching of the fracture surfaces and the influence of the recovery device on the initial recovery pattern.

The evolution of the anisotropic behavior in terms of fluid recovery according to direction and tangential displacement is complex in details but a general outline can be postulated. It seems that :

- The pre-peak phase studied in details from two tests (4 and 5) shows fluctuations in the recovery pattern linked to the initial closure phase followed by the beginning of dilatancy. This could be explained by the very small initial volume of voids available for the flow which increases or decreases rapidly for a very small shear displacement. To this volume variation, must be added a rapid modification in the connectivity of flow channels. The flow most likely occurs in many small channels that lie between the numerous points of contact of the fracture. A small tangential displacement, or a change in the flow rate, can change the major direction in the recovery pattern.

- The recovery pattern is systematically modified as the shear stress passes through the peak as compared to the recovery pattern during the corresponding pre-peak phase.

- The softening phase is characterized by a specific recovery pattern for each direction. The reduction in dilatancy rate occurring during this phase (test 4) is accompanied by a modification in the pattern only for a rate of 500 cm³/h. During this phase, the fracture is more open, and the flow occurs more easily through large channels that bypass contact damaged zones. In this shear displacement range, the recovery pattern corresponding to a low rate can differ from the recovery pattern associated with a higher rate due to gouge particles in the flow. Channels can be open or clogged by these gouge particles in combination with the flow rate.

- The reduction in dilatancy rate associated with the beginning of the residual shear behavior is accompanied systematically by a modification in the recovery pattern for all rates. This modification occurs in only one stage (tests 3 and 4) or in two stages (test 5).

- The reduction in dilatancy rate corresponding to the appearance of the residual shear behavior (particularly clear in test 4), is accompanied by a new modification in the recovery pattern only for rates of 500 and 1630 cm³/h.

Generally, passing through peak shear strength causes a reorientation of the main recovery direction subperpendicularity to the shear direction. This is true for all the rates considered. The gradual passage to residual shear behavior tends to modify recovery patterns more or less progressively to greatest isotropy and this occurs more rapidly with an high flow rate while dominant recovery directions are observed between 30 and 60° of the shear direction.

CONCLUSION

This first series of tests shows the improvement of the testing device, compared to tests performed during the feasibility phase. However, other improvements are still necessary for the testing device and the experimental procedure also (matching of the joint).

The series of tests performed to study the hydromechanical behavior of a fracture under shearing show clearly that the recovery pattern evolves not only with shear direction but also with the different phases identified on the shear behavior. Associated with this evolution of recovery patterns are clear variations of the global intrinsic transmissivity of the fracture, particularly for small shear displacements that are typical for engineering applications in fractured rock masses.

The study confirms the feasibility of such tests to determine joint shear hydromechanical behavior, and their importance for the understanding of fluid flow through fractures. However, this work is a preliminary approach and more tests are required to reach a better understanding. Moreover, a part of the analysis is based on recovery patterns. It remains now to determine the relationship between the recovery pattern and the flow pattern in the fracture. To reach this relationship, it will be necessary to ascertain the best possible geometrical knowledge of the void space and its evolution during shear. This will be possible by means of maps of the voids obtained by casting techniques, and through the analysis of damaged areas that occurs with shear displacement (Riss et al. 1996; this symposium). Probable channel networks could then be deduced, along with their evolution in these information in relation to shear displacement, and these data could be used for hydraulic modeling.

Aknowledgements

The works are jointly founded by BRGM (France) and University Quebec at Chicoutimi (Canada).

References

- Archambault G., Gentier S., Riss J., Flamand R., Sirieix C. (1996) . Joint shear behaviour revised on the basis of morphology 3D modelling and shear displacement - *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium*, Balkema, Ed. M. Aubertin, F. Hassani and H. Mitri, Montreal (Canada),19-21 June 1996, Vol. 2, pp 1223-1230.
- Esaki T., Nakahara K., Jiang Y., Mitani Y. (1995) - Effects of preceding shear history on shear-flow coupling properties of rock joints. *Proceedings of the International Symposium on Jointed and faulted rock*, Balkema, Vienne (Austria),10-14 April 1995, pp 501 -506.
- Flamand R., Archambault G., Gentier S., Riss J., Rouleau A. (1994) - An experimental study of the shear behavior of irregular joints based on angularities and progressive degradation of the surfaces. 47ème Conférence Canadienne de Géotechnique - Halifax (23-25 septembre 1994).
- Gale J. E., MacLeod R., and Le Messurier P. (1990) . Site characterization and validation. Measurement of flowrate, seepage velocities and aperture variation in natural fractures as function of normal and shear stress, stage 3. Technical Report Stripa Project 90-11.
- Gentier S., Petitjean C., Riss J., Archambault G.(1996) . Hydromechanical behaviour of a natural joint under shearing. *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium*, Balkema, Ed. M. Aubertin, F. Hassani and H. Mitri, Montreal (Canada),19-21 June 1996, Vol. 2, pp 1201-1208.
- Makurat A., Barton N., Rad N. S. et Bandis S. (1990) . Joint conductivity variation due to normal and shear deformation. *Proceeaings of the Internatonau Symposium on Rock Joints*, Balkema, Loen (Norway), 4-6 June 1990, pp 535 -540.
- Olsson W. A. and Brown S. R. (1993) . Hydromechanical response of a fracture undergoing compression and shear. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 30: 845-851.
- Riss J, Gentier S., Sirieix C., Archambault G, Flamand R. (1996). Degradation characterization of sheared joint wall surface morphology. *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium*, Balkema, Ed. M. Aubertin, F. Hassani and H. Mitri, Montreal (Canada),19-21 June 1996, Vol. 2, pp 1343-1349.
- Sharp J. C. and Maini Y. N. T. (1972) . Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joints in rock. *Proceedings of the symposium : Percolation through fissured rock*, Stuttgart (Germany), 1972. T1-F.

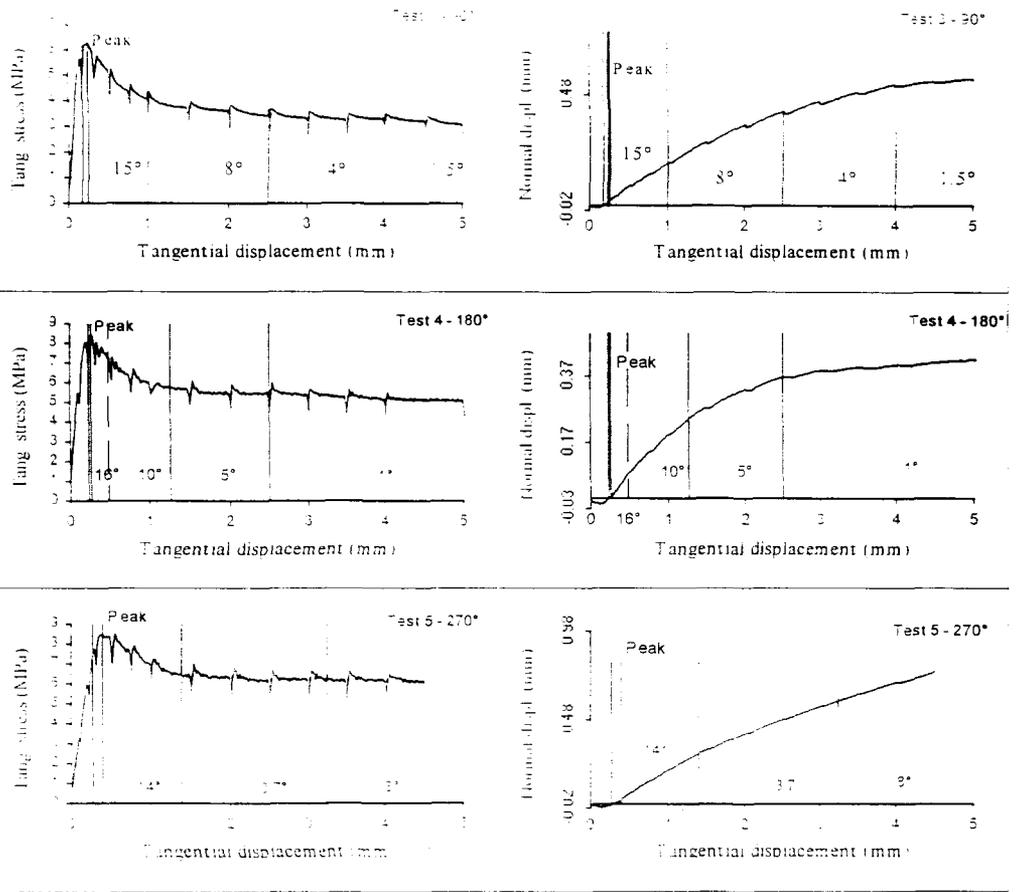


Figure 1: Tangential stress and normal displacement versus tangential displacement

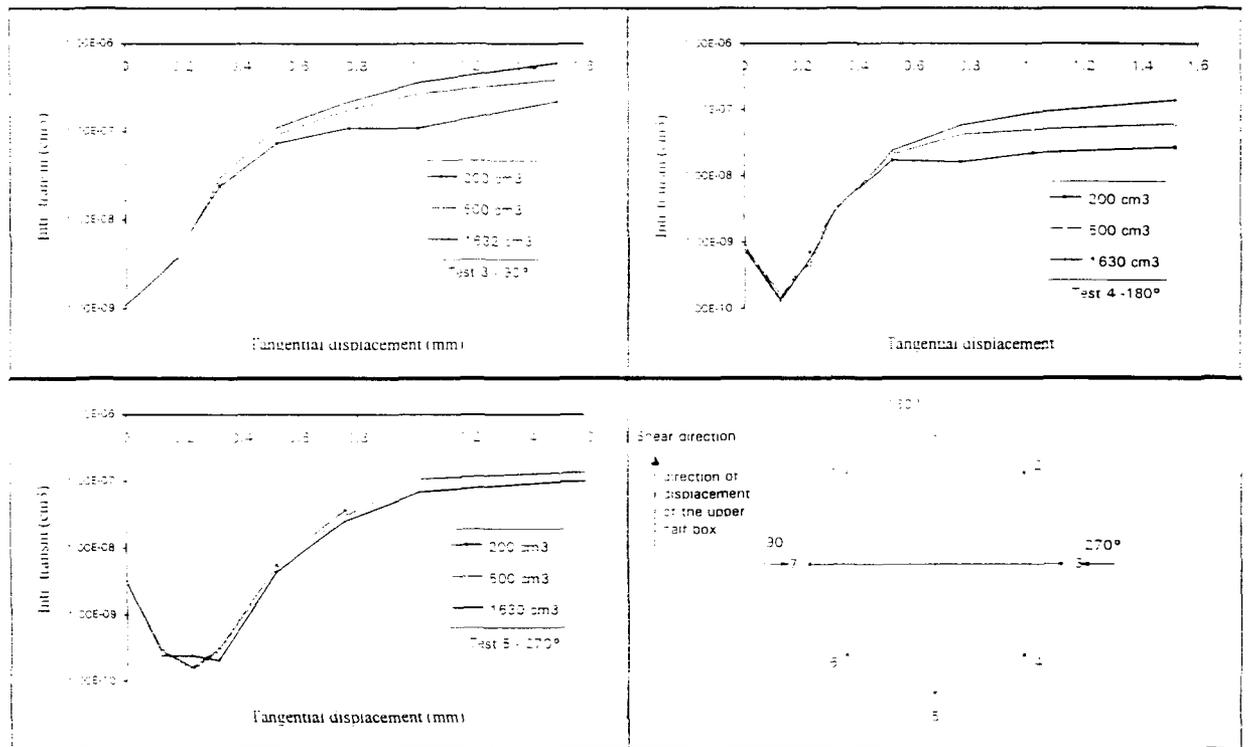


Figure 2: Evolution of global intrinsic transmissivity as a function of tangential displacement and successive locations of the reference mark for the three tests

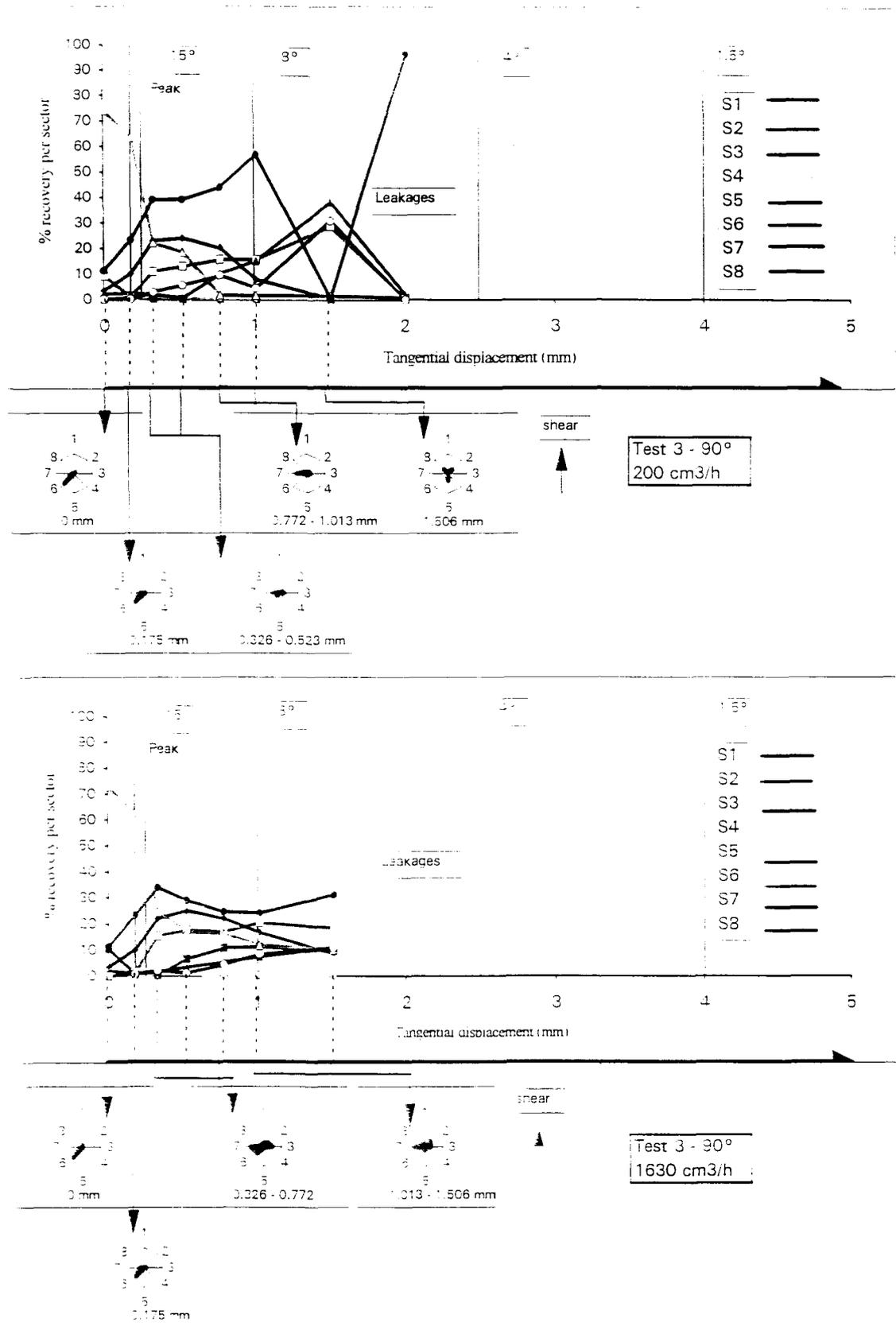


Figure 3 : Evolution of the recovery percentage per sector and recovery patterns associated - Test 3 -

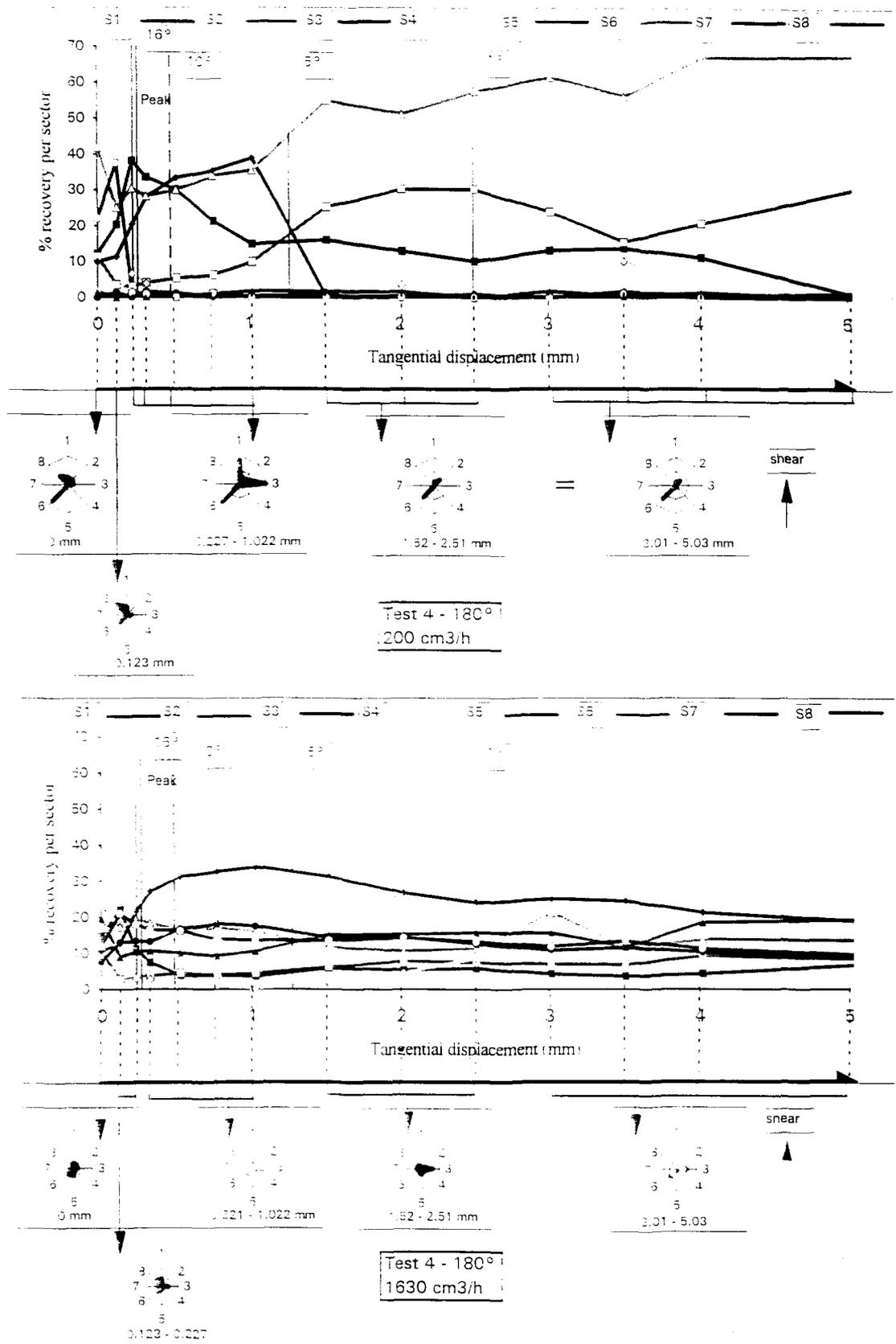


Figure 4 : Evolution of the recovery percentage per sector and recovery patterns associated - Test 4 -

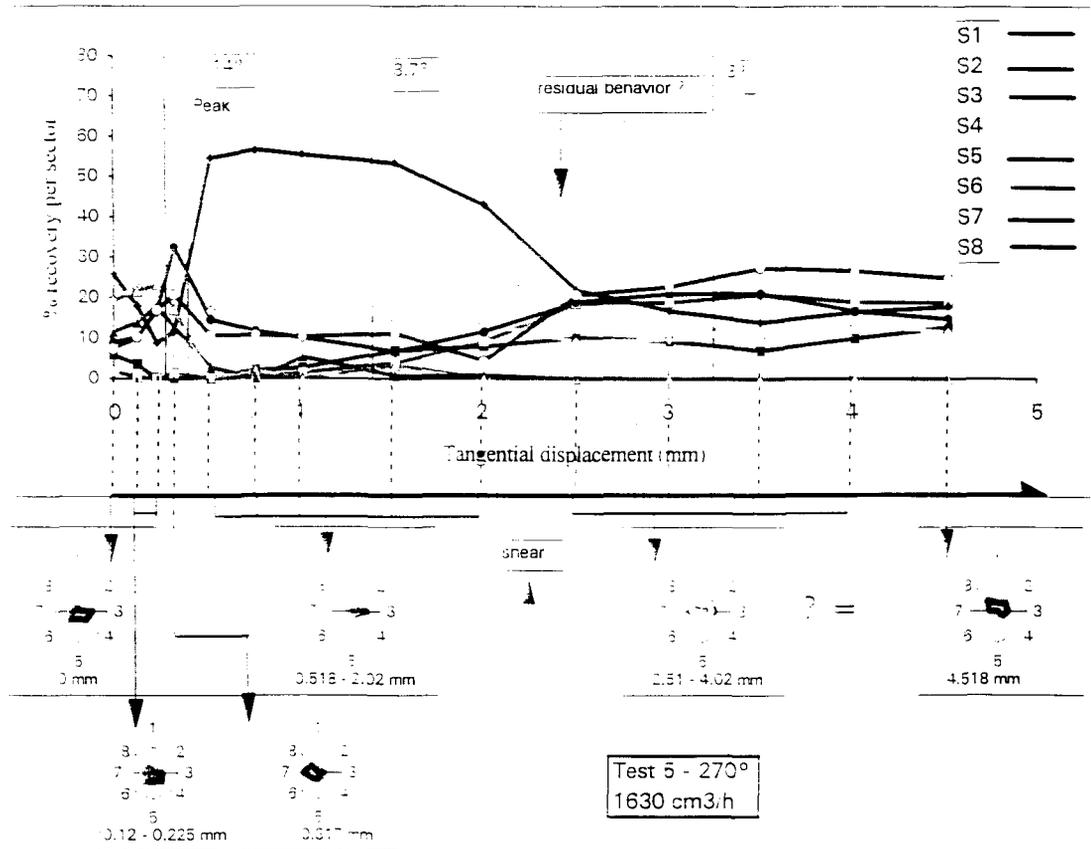
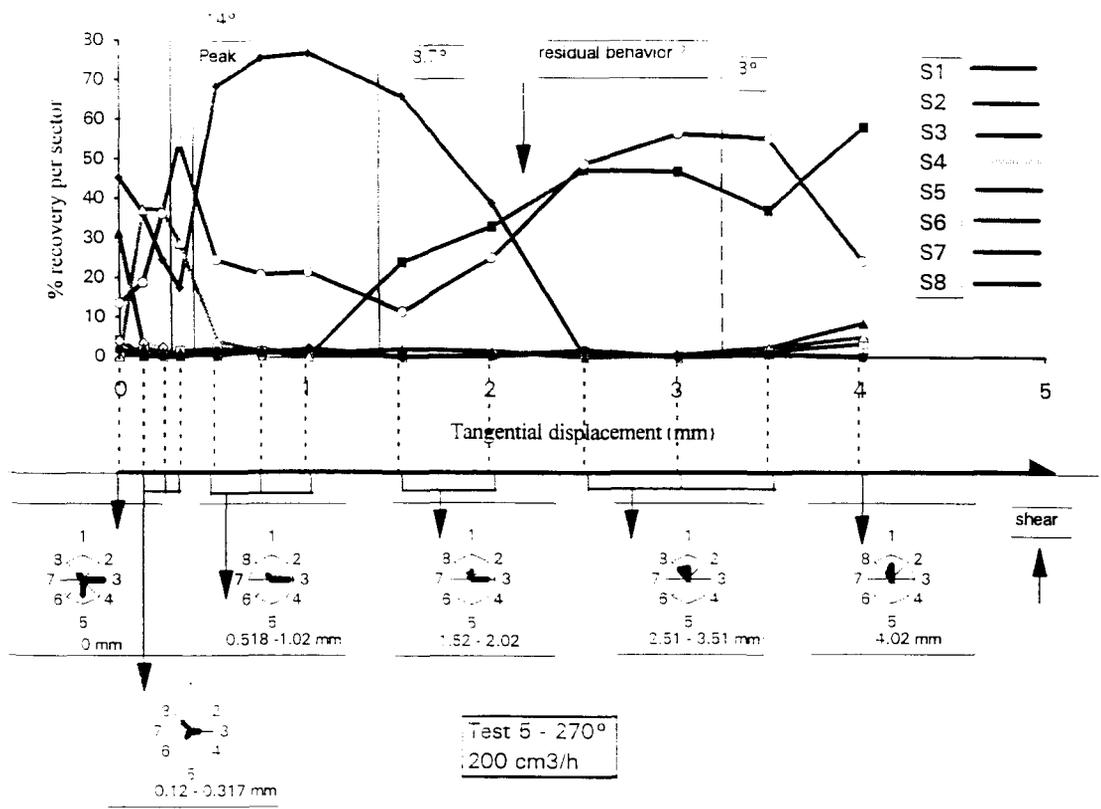


Figure 5 : Evolution of the recovery percentage per sector and recovery patterns associated - Test 5 -

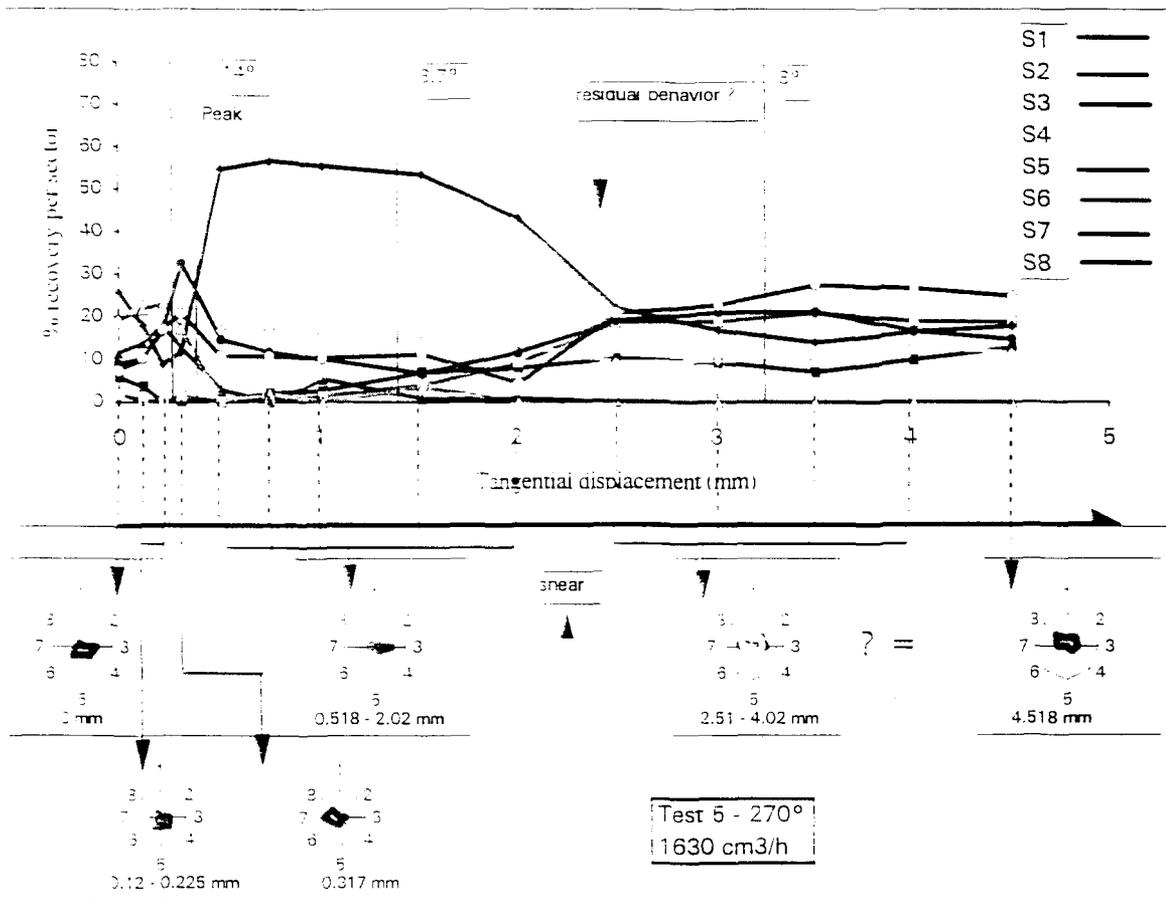
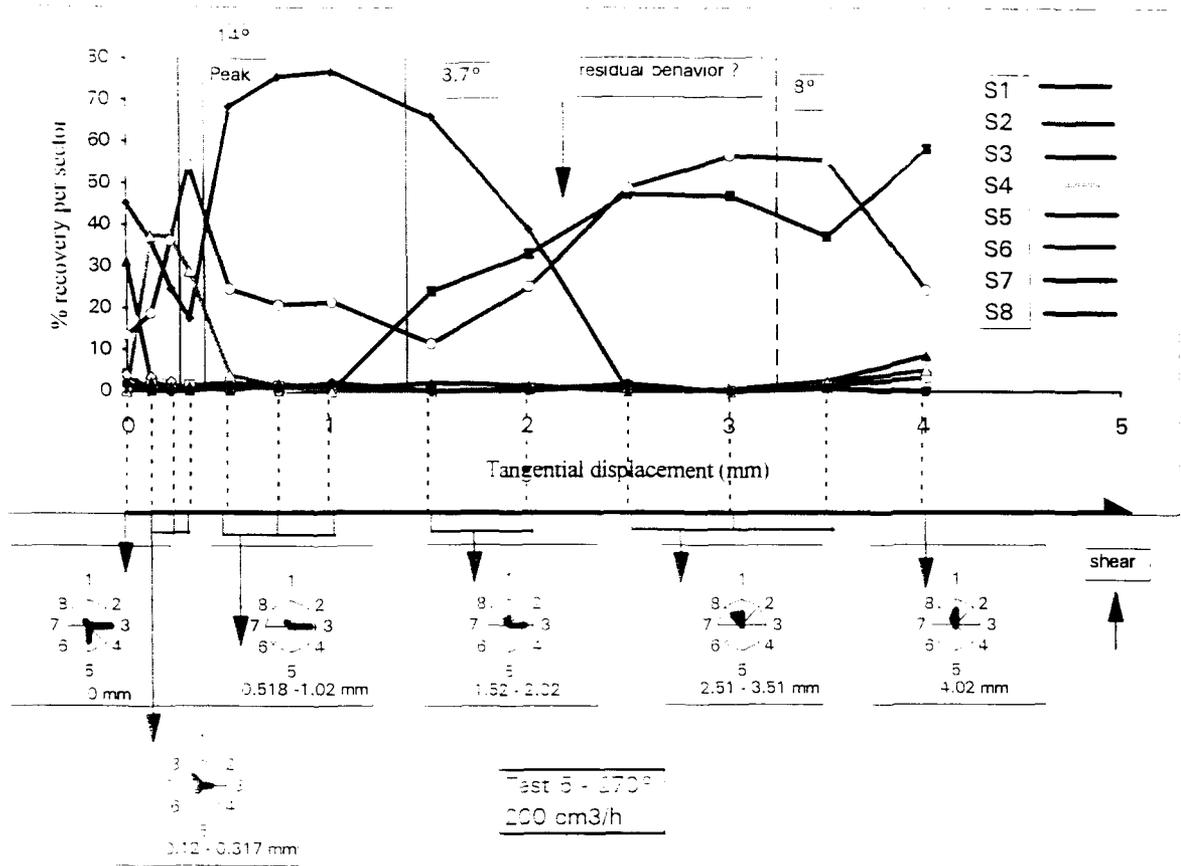


Figure 5 : Evolution of the recovery percentage per sector and recovery patterns associated - Test 5 -