

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉVALUATION DU FROTTEMENT INTERNE  
DE GÉOCOMPOSITES BENTONITIQUES  
AIGUILLETÉS

JEAN-FRANÇOIS BÉRARD  
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CIVIL)  
MAI 1997



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*

*Our file* *Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

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

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-33112-1

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉVALUATION DU FROTTEMENT INTERNE  
DE GÉOCOMPOSITES BENTONITIQUES  
AIGUILLETÉS

présenté par: BÉRARD Jean-François

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

Mme LEITE Maria-Helena, Ph.D., présidente

M. LAFLEUR Jean, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MLYNAREK Jacek, D.Sc.A., membre et codirecteur de recherche

M. ROLLIN André L., Ph.D., membre

*À Cory,  
aux anges  
Jean-Gabriel,  
Sébastien  
et ceux  
que je ne  
connais pas  
encore...*

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur Jean Lafleur et codirecteur Jacek Mlynarek pour leurs supports académiques et financiers, sans lesquels je n'aurais pu compléter ce travail.

Messieurs René Phaneuf et André Ducharme, responsables du support technique dans les laboratoires de géotechnique de l'école Polytechnique, doivent être spécialement remerciés pour leur enthousiasme et dynamisme inégalés, qui ont su m'aider à démarrer le projet du bon pied.

Mes remerciements s'étendent également à la firme SAGEOS de St-Hyacinthe pour avoir effectué les tests de résistance au pelage. Également, Kent von Maubeuge et la firme Naue Fasertechnik doivent être remerciés pour avoir fourni les échantillons nécessaires à la réalisation de cette recherche.

Finalement, je dois remercier mon épouse Cory pour sa patience, son support moral et pour avoir accepté d'avoir deux beaux garçons alors que je n'étais pas présent aussi souvent que prévu, passant plus de temps à m'occuper de l'hydratation de mes géocomposites qu'à celle de la couche de mes enfants...

## RÉSUMÉ

Le projet vise à déterminer en laboratoire l'influence des divers paramètres de résistance au cisaillement, nécessaires à l'analyse de stabilité des talus, lorsqu'en présence de géocomposites bentonitiques aiguilletés (GCB). Le programme expérimental comporte des essais à la boîte de cisaillement direct de 305 par 305 mm, pour la mesure des paramètres de Mohr-Coulomb sur six GCB aiguilletés différents, en utilisant des vitesses de cisaillement de 1, 0,1 et 0,01 mm/min, des contraintes normales de 25, 50 et 100 kPa ainsi qu'une gamme étendue de teneurs en eau de la bentonite.

Les résultats obtenus avec les GCB ont été comparés à ceux obtenus avec la bentonite seule afin de quantifier l'amélioration produite par l'armature de fibres au travers de la couche de bentonite. De plus, les différents GCB ont été soumis à des essais de pelage pour caractériser la résistance à la traction des fibres de l'aiguilletage. On a comparé les résultats d'essais de cisaillement direct avec ceux d'essais de pelage afin de déterminer la relation entre les deux types d'essai.

On a observé que l'angle de friction interne d'un GCB était relié à la résistance au pelage. On a également observé que la teneur en eau de la bentonite avait une influence sur l'angle de friction interne. Étant donné que le test de pelage ne tient pas compte de l'effet de la bentonite sur la résistance au cisaillement, le test de pelage seul n'est pas suffisant pour déterminer l'angle de friction interne d'un GCB. De plus, une contrainte normale doit toujours être appliquée lors de l'hydratation des GCB. Autrement, les pressions internes créées par le gonflement de la bentonite peuvent abîmer l'aiguilletage des GCB et réduire leur résistance au cisaillement interne de façon significative.

## ABSTRACT

The goal of this research program is to evaluate in laboratory the influence of various shear stress resistance parameters required for slope stability analysis, when needle-punched geosynthetic clay liners (GCLs) are used. The testing program is performed with a 305 by 305 mm direct shear box in order to measure the Mohr-Coulomb parameters of six different GCLs, using shear rates of 1, 0,1 and 0,01 mm per minute, normal stresses of 25, 50 and 100 kPa as well as a wide range of bentonite moisture contents.

Results obtained with the GCLs were compared with those obtained with the bentonite in order to quantify the improvement created by the reinforcing fibers passing through the bentonite layer. The GCLs were also submitted to peel tests in order to characterize the needle-punched fibers' resistance to traction forces. We then compared the direct shear test results with the peel test results and evaluated the relationship between the two tests.

We have observed that a connection exists between the internal angle of friction and the peel test resistance of a GCL. We have also observed that the bentonite moisture content has an influence on the friction angle. Considering that the peel test does not take into account the bentonite's effect on the internal shear resistance, the peel test alone is not sufficient to determine the internal angle of friction of a GCL. Furthermore, a normal stress must always be applied to GCLs during their hydration. Otherwise, the internal pressure created by the swelling of the bentonite may damage the needle-punched fibers, therefore significantly reducing the GCLs' internal shear stress resistance.

**TABLE DES MATIÈRES**

|  |      |
|--|------|
| <b>DÉDICACE</b> .....  | iv   |
| <b>REMERCIEMENTS</b> .....                                       | v    |
| <b>RÉSUMÉ</b> .....  | vi   |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | vii  |
| <b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....                                  | viii |
| <b>LISTE DES ANNEXES</b> .....                                   | xi   |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....                                  | xii  |
| <b>LISTE DES FIGURES</b> .....                                   | xiv  |
| <b>LISTE DES SYMBOLES</b> .....                                  | xvi  |
| <br>   |      |
| <b>CHAPITRE I : INTRODUCTION</b> .....                           | 1    |
| 1.1 Généralités .....  | 1    |
| 1.2 Description des GCB aiguilletés .....                        | 2    |
| 1.3 Domaine d'application des GCB .....                          | 4    |
| 1.4 Propriétés des GCB .....                                     | 5    |
| 1.5 Problématique de la résistance au cisaillement des GCB ..... | 6    |
| 1.5 Objectifs du projet .....                                    | 8    |
| <br>   |      |
| <b>CHAPITRE II : MISE EN SITUATION DU PROBLÈME</b> .....         | 9    |
| 2.1 Résistance au cisaillement .....                             | 9    |
| 2.2 Description de la bentonite .....                            | 10   |
| 2.3 Influence des fibres dans la matrice d'argile .....          | 12   |
| 2.4 Conditions d'utilisation .....                               | 16   |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 2.4.1  | Teneurs en eau .....                              | 16        |
| 2.4.2  | Contraintes normales .....                        | 18        |
| 2.4.3  | Vitesse de cisaillement.....                      | 19        |
| 2.4.4  | État submergé et non-submergé .....               | 20        |
| 2.5  | Paramètres étudiés .....                          | 21        |
| <b>CHAPITRE III : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE .....</b>            |   | <b>22</b> |
| 3.1  | Généralités .....                                 | 22        |
| 3.2  | Description des produits testés .....             | 22        |
| 3.3  | Conditions d'essais .....                         | 23        |
| 3.4  | Appareillage et procédures .....                  | 25        |
| 3.4.1  | Préparation des échantillons de GCB.....          | 25        |
| 3.4.2  | Hydratation des GCB.....                          | 27        |
| 3.4.3  | Cisaillement des GCB.....                         | 30        |
| 3.4.4  | Teneur en eau des GCB.....                        | 36        |
| 3.4.5  | Cisaillement de la bentonite .....                | 37        |
| 3.4.6  | Hydratation des GCB à l'oedomètre .....           | 38        |
| 3.4.7  | Caractérisation de la bentonite (gonflement)..... | 38        |
| 3.4.8  | Test de pelage.....                               | 39        |
| <b>CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....</b> |   | <b>40</b> |
| 4.1  | Généralités .....                                 | 40        |
| 4.2  | Caractéristiques des GCB utilisés .....           | 40        |
| 4.3  | Temps d'hydratation et gonflement des GCB.....    | 41        |
| 4.4  | Cisaillement des GCB .....                        | 43        |
| 4.4.1  | Résultats .....                                   | 43        |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 4.4.2   | État des fibres de l'aiguilletage au démontage.....                | 45        |
| 4.4.3   | Déplacement requis pour mobiliser $\tau_{\max}$ .....              | 48        |
| 4.4.4   | Résistance résiduelle au cisaillement ( $\tau_{\text{rés}}$ )..... | 50        |
| 4.5   | Cisaillement de la bentonite seule.....                            | 53        |
| 4.6   | Influence de la vitesse de cisaillement.....                       | 55        |
| 4.7   | Influence de la teneur en eau sur $\tau_{\max}$ .....              | 58        |
| 4.8   | Angle de friction interne.....                                     | 60        |
| 4.9   | Relation entre le test de pelage et l'angle de friction.....       | 61        |
| 4.10  | Influence de la submersion.....                                    | 63        |
| 4.11  | Influence de l'hydratation libre (sans contrainte).....            | 63        |
| 4.12  | Cohésion.....  | 66        |
| 4.13  | Amélioration produite par l'aiguilletage.....                      | 67        |
| <b>CHAPITRE V : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</b> |  | <b>70</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>                               |  | <b>73</b> |
| <b>ANNEXES.....</b>                                     |  | <b>76</b> |

**LISTE DES ANNEXES**

|                      |   |            |
|----------------------|---|------------|
| <b>ANNEXE I :</b>    | <b>Essais de résistance au cisaillement direct .....</b>  | <b>76</b>  |
| <b>ANNEXE II :</b>   | <b>Sommaire des résultats des essais de résistance au<br/>cisaillement direct.....</b>  | <b>120</b> |
| <b>ANNEXE III :</b>  | <b>Graphiques servant à déterminer les paramètres<br/>de Mohr-Coulomb.....</b>  | <b>124</b> |
| <b>ANNEXE IV :</b>   | <b>Relation entre le temps d'hydratation, la contrainte normale et<br/>la teneur en eau - Relation entre la teneur en eau,<br/>la contrainte normale, la vitesse de cisaillement et<br/>la résistance au cisaillement maximum .....</b> | <b>139</b> |
| <b>ANNEXE V :</b>    | <b>Déplacement requis pour mobiliser la résistance au<br/>cisaillement maximum .....</b>  | <b>147</b> |
| <b>ANNEXE VI :</b>   | <b>Courbes présentant le gonflement de la bentonite avant<br/>le cisaillement de la bentonite seule.....</b>  | <b>149</b> |
| <b>ANNEXE VII :</b>  | <b>Influence de la vitesse de cisaillement sur la résistance<br/>au cisaillement maximum (ensemble des résultats) .....</b>   | <b>151</b> |
| <b>ANNEXE VIII :</b> | <b>Précision des mesures .....</b>  | <b>153</b> |

## LISTE DES TABLEAUX

|   |    |
|---|----|
| <b>Tableau 3.1</b> - Nombre d'essais de cisaillement direct effectués sur l'ensemble des échantillons de GCB, selon différentes conditions d'essais.....                | 24 |
| <b>Tableau 4.1</b> - Caractéristiques des GCB utilisés.....   | 41 |
| <b>Tableau 4.2</b> - Rupture des fibres de l'aiguilletage en % de la surface du GCB après cisaillement.....   | 46 |
| <b>Tableau 4.3</b> - Résistances résiduelles au cisaillement ( $\tau_{res}$ ) lors des essais de cisaillement interne des GCB.....                                      | 51 |
| <b>Tableau 4.4</b> - Influence de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement maximum, pour des GCB hydratés pendant 14 jours ou plus (44 essais)..... | 56 |
| <b>Tableau 4.5</b> - Relation entre la variation absolue de la teneur en eau et la variation relative de la résistance au cisaillement maximum pour chaque GCB.....     | 59 |
| <b>Tableau 4.6</b> - Angles de friction interne déterminés à partir des résistances au cisaillement maximum.....  | 60 |
| <b>Tableau 4.7</b> - Cohésion des GCB.....  | 67 |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tableau 4.8 - Relation entre la bentonite seule et certains GCB cisailés à 1 mm/min, afin de quantifier l'amélioration produite par l'aiguilletage sur <math>\tau_{\max}</math> .....</b> | <b>69</b> |
|--|-----------|

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Tableau 4.9 - Paramètres de Mohr-Coulomb pour les GCB no. 1 à 6 et pour la bentonite seule, correspondant à une vitesse de cisaillement de 1 mm/min et une durée d'hydratation supérieure à 14 jours .....</b> | <b>69</b> |
|---|-----------|

## LISTE DES FIGURES

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Figure 1.1 - Présentation schématique du procédé de fabrication des GCB aiguilletés .....</b> | <b>3</b>  |
| <b>Figure 1.2 - Section type de système d'étanchéité d'un site d'enfouissement.....</b>          | <b>7</b>  |
| <b>Figure 2.1 - Représentation schématique de l'influence des fibres de l'aiguilletage ....</b>  | <b>13</b> |
| <b>Figure 3.1 - Schéma d'un échantillon de GCB avec lignes guides.....</b>                       | <b>26</b> |
| <b>Figure 3.2 - Échantillons de GCB avec le gabarit utilisé pour les tailler .....</b>           | <b>27</b> |
| <b>Figure 3.3 - Banc de chargement principal servant à hydrater les échantillons de GCB.....</b> | <b>28</b> |
| <b>Figure 3.4 - Photo du montage pour cisailer à 1 mm/min (test en cours).....</b>               | <b>32</b> |
| <b>Figure 3.5 - Photo du montage pour cisailer à 0,1 et 0,01 mm/min (test complété) .....</b>    | <b>32</b> |
| <b>Figure 3.6 - Boîte de cisaillement avec échantillon de GCB .....</b>                          | <b>33</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figure 3.7 - Schéma du système d'attache d'un géotextile sur la boîte de cisaillement inférieure .....</b>   | <b>34</b> |
| <b>Figure 4.1 - Gonflement des GCB 1, 2 et 3 lors de leur hydratation à 20 et 100 kPa .....</b>   | <b>42</b> |
| <b>Figure 4.2 - Exemple de trois essais de résistance au cisaillement et enveloppe de Mohr-Coulomb associée .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>Figure 4.3 - Relation entre et la valeur moyenne de la surface en % où l'aiguilletage a été défait et la résistance au pelage des GCB .....</b>                            | <b>48</b> |
| <b>Figure 4.4 - Relation entre le déplacement requis pour mobiliser <math>\tau_{max}</math> et la surface (en %) où l'aiguilletage a été défait .....</b>                     | <b>49</b> |
| <b>Figure 4.5 - Influence de la teneur en eau sur <math>\tau_{rés}</math> tout en tenant compte de la vitesse de cisaillement et de la contrainte normale appliquée .....</b> | <b>52</b> |
| <b>Figure 4.6 - Essais de résistance au cisaillement et enveloppe de Mohr-Coulomb associée pour la bentonite seule (Volclay SPV 200) .....</b>                                | <b>54</b> |
| <b>Figure 4.7 - Relation entre le test de pelage et l'angle de friction interne des GCB.....</b>  | <b>62</b> |
| <b>Figure 4.8 - Relation entre la teneur en eau et la résistance au cisaillement maximum, selon la contrainte normale et la vitesse, pour le GCB no. 5.....</b>               | <b>65</b> |

## LISTE DES SYMBOLES

|                 |  |
|-----------------|--|
| $\Delta M_w$    | erreur absolue sur la masse d'eau (g)  |
| $\Delta M_s$    | erreur absolue sur la masse de sol sec (g)   |
| $\Delta \tau_F$ | augmentation de la résistance au cisaillement provenant de la présence de fibres dans la bentonite (kPa)   |
| $\Delta w$      | erreur absolue sur la teneur en eau (%)  |
| $\phi$          | angle de frottement interne (degré)  |
| $\sigma$        | contrainte normale (kPa)   |
| $\tau$          | résistance au cisaillement (kPa)   |
| $\tau_r$        | résistance au cisaillement à la rupture (kPa)  |
| $\tau_{max}$    | résistance au cisaillement maximum (kPa)   |
| $\tau_{res}$    | résistance résiduelle au cisaillement (kPa)  |
| $\tau_{10}$     | pourcentage d'augmentation entre deux valeurs de résistance au cisaillement lors de l'augmentation de la vitesse de cisaillement par un facteur de 10 (%)  |
| $\tau_{100}$    | pourcentage d'augmentation entre deux valeurs de résistance au cisaillement lors de l'augmentation de la vitesse de cisaillement par un facteur de 100 (%) |
| $\theta$        | angle de distorsion (degré)  |
| $c$             | cohésion (kPa)   |
| $H$             | durée d'hydratation (heure)  |
| $J$             | durée d'hydratation (jour)   |
| $M_w$           | masse d'eau (g)  |
| $M_s$           | masse de sol sec (g)   |

- $r$  coefficient de corrélation
- $T_F$  contrainte de traction appliquée sur les fibres de l'aiguilletage, pour une aire de GCB donnée (kPa)
- $w$  teneur en eau (%)

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

#### 1.1 Généralités

Les géocomposites bentonitiques (GCB) occupent une place de plus en plus importante au sein de la grande famille des géosynthétiques. De nouveaux produits sont fréquemment introduits sur le marché, obligeant le concepteur d'ouvrages d'art voulant utiliser ces produits à rester aux aguets afin d'utiliser celui qui répondra le mieux à ses besoins, autant techniques que financiers. Cependant, l'arrivée d'un nouveau produit amène également son cortège de questions aux réponses mal définies, principalement au sujet des paramètres de conception à utiliser afin d'assurer la sécurité et le rendement adéquat d'un projet.

Il existe quatre groupes différents de propriétés pouvant intéresser l'utilisateur de GCB, soit les propriétés physiques, mécaniques, hydrauliques et celles dites d'endurance. La résistance au cisaillement direct, appartenant au groupe traitant des propriétés mécaniques, de concert avec certaines propriétés physiques, sont étudiées dans ce mémoire. De plus, il existe plusieurs types de GCB disponibles sur le marché, divisés en trois catégories: les GCB aiguilletés, cousus ou collés. Les GCB aiguilletés font l'objet de cette étude.

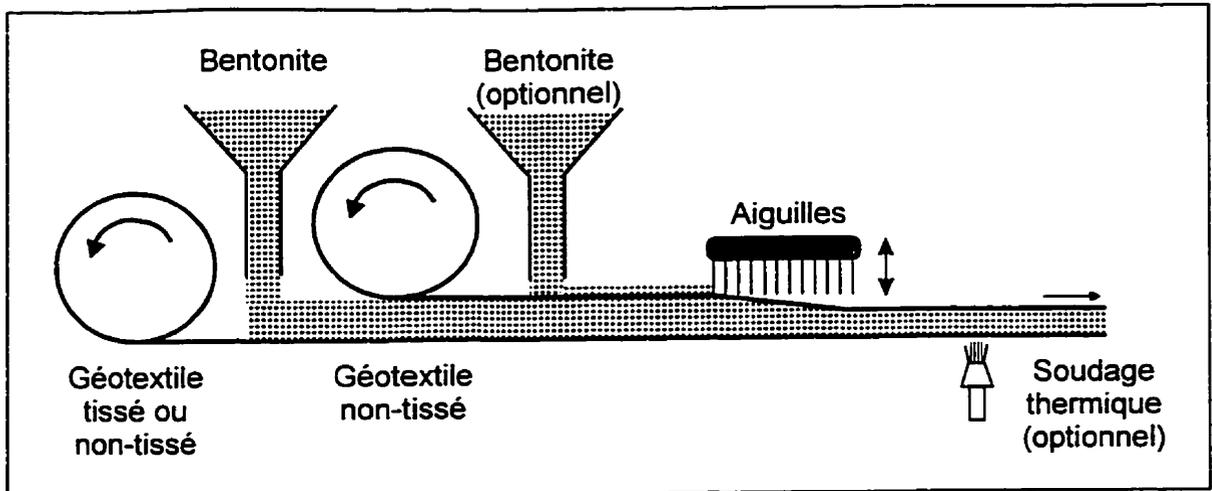
L'évaluation faite par cette recherche sur le frottement interne de géocomposites bentonitiques aiguilletés devrait permettre de mieux comprendre l'interaction et l'influence de différents paramètres sur la résistance au cisaillement interne de ces produits.

## 1.2 Description des GCB aiguilletés

C'est au milieu des années 80 qu'apparurent sur le marché les premiers rouleaux de GCB. La première fois que ce géosynthétique fut utilisé aux États-Unis était en 1986 pour un site d'enfouissement de déchets solides. La fonction première des GCB était, et est encore, de créer une barrière hydraulique pour de l'eau, des lixiviats ou d'autres liquides. Ils sont un compromis entre les géomembranes pour leur facilité d'installation, et l'argile compactée, pour ses qualités d'imperméabilisation. Une étude comparative de ces trois matériaux n'est pas l'objet de cette recherche, mais existe dans la littérature traitant sur les géocomposites.

La norme ASTM D4439 définit le géocomposite bentonitique comme étant une barrière hydraulique manufacturée, composée d'argile bentonitique ou d'un autre matériau à perméabilité très faible, supportée par des géotextiles et/ou des géomembranes qui sont maintenus ensemble au moyen d'aiguilletage, de coutures ou d'adhésifs chimiques. La présence de ce lien entre les deux couches de géosynthétique est primordiale car c'est lui qui fournit la plus grande partie de la résistance au cisaillement interne du GCB.

Le GCB aiguilleté est donc conçu comme une couche de bentonite granulaire ou en poudre confinée entre deux géotextiles au moyen d'une série de fibres fines aiguilletées. Il contient approximativement 3,5 ou 5,0 kg/m<sup>2</sup> de bentonite, et est manufacturé en panneaux mesurant de 4 à 5 mètres de large et de 25 à 60 mètres de long. Les panneaux sont placés sur des rouleaux en usine avant d'être envoyés sur le site de construction où ils seront déroulés à leur emplacement final. Un schéma du procédé de fabrication est présenté à la figure 1.1.



**Figure 1.1 - Présentation schématique du procédé de fabrication des GCB aiguilletés.**

L'aiguilletage se fait grâce à un peigne comprenant une multitude d'aiguilles fines ayant chacune plusieurs minuscules crochets, qui lorsque introduites dans le géotextile supérieur tirent des fibres qui iront se coincer dans le géotextile inférieur. Pour que l'aiguilletage puisse se produire il faut que le géotextile supérieur soit non tissé; les fibres de ce dernier sont généralement constituées de polypropylène. Le géotextile inférieur, qui constitue le support du GCB, peut être tissé ou non-tissé. Une densité de fibres ainsi tirées d'environ 2,5 millions par mètre carré est obtenue par ce procédé, créant un lien quasi continu des deux géotextiles sur toute la surface du matériau composite ainsi créé. En plus d'améliorer les propriétés mécaniques du GCB, l'aiguilletage réduit au minimum le déplacement de la bentonite autant à l'état sec qu'à l'état hydraté. Le géotextile non tissé répond également au critère de filtre requis pour empêcher la migration de la bentonite hors du GCB.

De plus, il est possible de remplir les vides du géotextile non tissé avec de la bentonite en poudre afin de prévenir l'écoulement latéral d'un liquide au sein même du géotextile. Également, un procédé thermique peut être utilisé en fin de fabrication, afin de mieux assurer l'ancrage des fibres de l'aiguilletage dans le géotextile inférieur en les soudant l'un à l'autre.

Finalement, la bentonite d'origine montmorillonitique, provenant de cendres volcaniques, est utilisée principalement à cause de sa faible perméabilité lorsque hydratée. Cependant, il est important de souligner que toutes les bentonites n'ont pas la même minéralogie, ce qui entraîne nécessairement une variation plus ou moins importante des leurs propriétés chimiques et physiques.

### **1.3 Domaine d'application des GCB**

L'objectif principal des GCB est de servir comme barrière étanche, mais ils peuvent aussi être utilisés comme élément séparateur et couche de protection. De plus, ils peuvent être employés seuls ou en conjonction avec d'autres matériaux, tels que les géogrilles, géotextiles, géomembranes, etc. La liste des différents projets auxquels peuvent s'intégrer les GCB n'est limitée que par l'imagination des concepteurs. En voici quelques exemples:

- site d'enfouissement sanitaire
- cellules d'enfouissement de déchets toxiques
- bassin de rétention pour l'eau ou autre liquide
- bassin de résidus miniers
- barrière étanche aux gaz (e.g. couverture finale pour site d'enfouissement)

- canaux pour transport de l'eau
- fondations d'édifice
- barrages
- routes
- tunnels

#### **1.4 Propriétés des GCB**

Les quatre différents groupes de propriétés des GCB aiguilletés, soit les propriétés physiques, mécaniques, hydrauliques et celles dites d'endurance, doivent être évalués séparément selon le projet. Chaque groupe comprend les éléments suivants:

##### Propriétés physiques

- minéralogie de l'argile
- épaisseur
- masse par unité de surface (masse surfacique)
- type d'agent chimique pour lier la bentonite (si utilisé)
- teneur en eau de la bentonite

##### Propriétés hydrauliques

- hydratation de la bentonite (selon la charge normale appliquée et le liquide utilisé)
- gonflement libre de la bentonite (aucune charge normale)
- conductivité hydraulique (perméabilité)
- perméabilité au niveau des joints
- perméabilité après déformation

### Propriétés mécaniques

- résistance à la tension (état libre)
- résistance à la tension (état confiné)
- résistance à la tension axisymétrique
- résistance au cisaillement direct
- résistance au poinçonnement
- résistance au déchirement

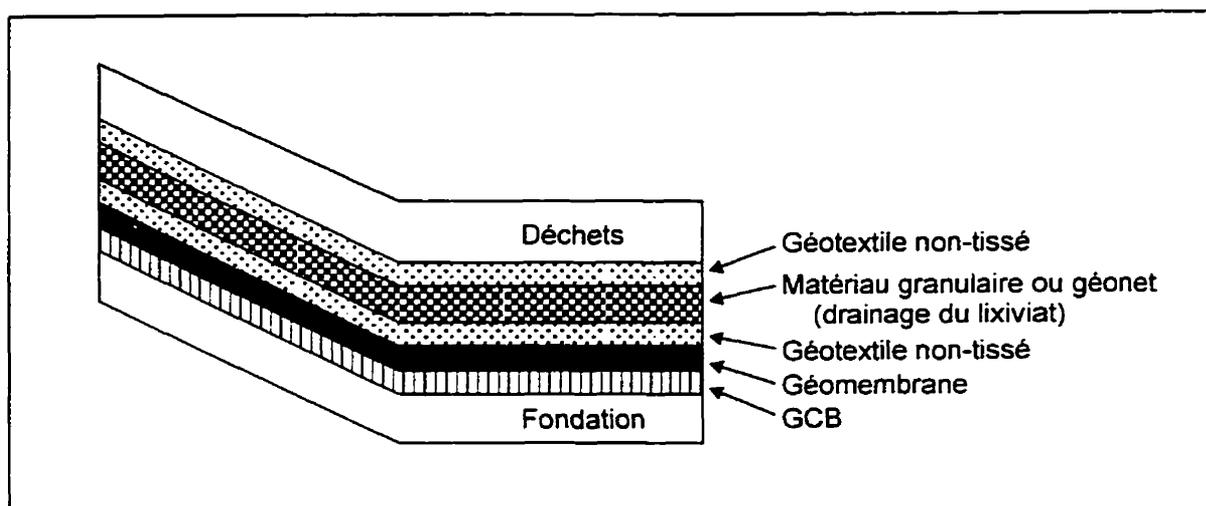
### Propriétés d'endurance

- influence du cycle gel-dégel
- influence du cycle hydratation-assèchement
- compatibilité chimique des GCB avec différents perméants

## **1.5 Problématique de la résistance au cisaillement des GCB**

Tel que mentionné précédemment, la résistance au cisaillement interne des GCB fait l'objet de la présente recherche. Cette caractéristique prend toute son importance lorsque ceux-ci sont placés sur une pente et qu'une charge verticale est appliquée. L'absence d'aiguilletage ou de coutures entre les deux géosynthétiques du GCB ferait que ceux-ci se déplaceraient l'un par rapport à l'autre, même pour une charge verticale et une pente relativement faible, étant donné que l'angle de friction interne résiduel de la bentonite hydratée varie de 4 à 10 degrés (Chattopadhyay, 1972), selon les conditions lors des tests (teneur en eau, contraintes normales, vitesse de cisaillement, etc.).

Les GCB sont le plus souvent utilisés dans les sites d'enfouissement, soit comme élément du système d'étanchéité et de collecte de lixiviat, soit comme élément de la couche finale ou de fermeture du site. Le GCB utilisé dans un système d'étanchéité peut être utilisé seul ou avec d'autres matériaux, créant ainsi un grand nombre de combinaisons possibles. Une pratique courante consiste à utiliser une géomembrane comme système primaire d'étanchéité et de drainage du lixiviat, alors que le GCB sert de système secondaire, situé sous le premier système. La figure 1.2 qui suit montre un exemple d'une section type de système d'étanchéité pour un site d'enfouissement.



**Figure 1.2 - Section type de système d'étanchéité d'un site d'enfouissement**

La stabilité des talus dépendra de l'élément le plus faible de l'ensemble, soit le sol de la fondation, la résistance interne au cisaillement du GCB, l'interface GCB-sol, GCB-géomembrane, GCB-géotextile ou toute autre combinaison des différentes composantes attenantes d'un système d'étanchéisation.

## 1.6 Objectifs du projet

Les GCB sont fréquemment utilisés pour l'étanchéisation des cellules d'enfouissement et de stockage liquide. Ces ouvrages comportent des talus où la surface de bentonite constitue un plan de faiblesse sur lequel des ruptures sont susceptibles de se produire. Le projet visera à déterminer en laboratoire l'influence des divers paramètres de résistance au cisaillement nécessaires à l'analyse de stabilité des talus.

Le programme expérimental comportera des essais à la boîte de cisaillement direct de 305x305 mm, pour la mesure des paramètres de Mohr-Coulomb sur six produits aiguilletés différents, en utilisant diverses vitesses de cisaillement ainsi qu'une gamme étendue de teneurs en eau de la bentonite. De plus, les résultats obtenus avec les GCB seront comparés à ceux obtenus avec la bentonite seule afin de quantifier l'amélioration produite par l'armature de fibres au-travers de la couche de bentonite.

Les différents GCB seront également soumis à des essais de pelage, utilisés pour caractériser la résistance à la traction des fibres de l'aiguilletage. Les résultats obtenus lors des essais de cisaillement direct seront comparés avec ceux obtenus lors des essais de pelage afin de déterminer quelle est la relation entre les deux types d'essai. L'utilisation de l'essai de pelage afin de déterminer l'angle de friction interne des GCB pourrait s'avérer intéressante pour les utilisateurs de ces produits, étant donné que cet essai est plus facile à réaliser que l'essai de cisaillement direct.

## CHAPITRE II

### MISE EN SITUATION DU PROBLÈME

#### 2.1 Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement d'un sol dépend de plusieurs paramètres. Cependant, l'influence de chaque paramètre sur la résistance au cisaillement, ainsi que l'influence de ces paramètres entre eux n'est pas toujours bien connue. Mitchell (1993) a identifié chacun de ces paramètres, et l'équation correspondante qui devrait être utilisée pour considérer l'influence de tous ces paramètres sur la résistance au cisaillement aurait la forme suivante:

$$\text{Résistance au cisaillement} = f(e, C, \sigma, H, T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, S)$$

où

- e = l'indice des vides,
- C = la composition du sol,
- $\sigma$  = la contrainte normale au plan de rupture,
- H = l'histoire des contraintes antérieures auxquelles le sol fut soumises,
- T = la température,
- $\varepsilon$  = les déformations induites dans le sol,
- $\dot{\varepsilon}$  = la vitesse de déformation,

et

- S = la structure du sol.

Le présent chapitre va isoler certains de ces paramètres, soit la composition et la structure du sol en considérant la présence de fibres, la contrainte normale et la vitesse

de déformation. De plus, il servira à identifier quels seront les effets de la variation de ces paramètres sur la résistance au cisaillement interne des GCB.

Dans le but de faciliter la comparaison de différents matériaux soumis à des contraintes de cisaillement, l'enveloppe de rupture de Mohr déterminée après plusieurs essais de cisaillements peut être remplacée de manière approximative par une équation du premier degré, pour une plage donnée de contraintes normales, et la droite résultante correspond à l'enveloppe de Mohr-Coulomb qui se définit de la façon suivante:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c$$

où

- $\tau_f$  = la résistance au cisaillement à la rupture, en kPa,
- $\sigma$  = la contrainte normale au plan de rupture, en kPa,
- $\phi$  = l'angle de frottement interne, en degré,
- $c$  = la cohésion, en kPa.

Les paramètres  $\phi$  et  $c$ , également appelés paramètres de Mohr-Coulomb, ne sont pas intrinsèques au sol mais plutôt dépendent des conditions lors des essais de cisaillement. L'angle de frottement interne correspond à l'angle de la droite par rapport à l'axe horizontal, alors que la cohésion correspond à l'ordonnée à l'origine.

## 2.2 Description de la bentonite

Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui proviennent pour la plupart de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Ces cristaux sont très petits (de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ ) et forment des feuillets qui possèdent une

superficie très élevée par rapport à leur faible masse, phénomène qui aura un impact direct sur le comportement de ces cristaux, appelés colloïdaux.

Il existe deux types de feuillets, soit les feuillets en tétraèdre, comprenant un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène, ou soit les feuillets en octaèdre, composés de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle (radical OH) entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou d'un autre élément. Certains empilements caractéristiques de ces deux types de feuillets de base formeront différents minéraux argileux, chacun possédant des caractéristiques qui lui seront propres.

Ainsi, la bentonite qui provient de la déposition de cendres volcaniques est constituée principalement de Montmorillonite, substance cristalline caractérisée par la présence d'un feuillet en octaèdre pris entre deux feuillets en tétraèdre, le feuillet en octaèdre ayant principalement un atome d'aluminium comme élément particulier.

De plus, les cendres volcaniques qui ont été déposées dans un milieu marin ou un milieu d'eau douce auront formé de la bentonite de sodium ou de la bentonite de calcium respectivement. La bentonite de sodium possède une plus grande capacité d'adsorption d'eau, pouvant occuper un volume à l'état saturé d'environ 14 à 16 fois son volume initial à l'état sec, soit 4 à 5 fois plus que la bentonite de calcium.

Divers travaux de recherche impliquant le cisaillement direct de la bentonite ont été effectués. Daniel, Shan et Anderson (1993) ont démontré que lorsque la teneur en eau de la bentonite passait de 17% à environ 100%, la résistance au cisaillement drainé d'échantillons de GCB non renforcés, soumis à une contrainte normale de 105 kPa, diminuait de 54%. Cette même variation de la teneur en eau a fait varier l'angle de

friction interne de 36° à 12° respectivement. D'autres GCB non renforcés ont été hydratés par le Geosynthetics Research Institute (GRI, 1991) avec de l'eau ayant différentes concentrations en électrolytes. La diminution de la concentration en électrolytes fait augmenter la teneur en eau de la bentonite, ce qui a pour effet de diminuer la résistance au cisaillement de la bentonite.

De plus, la vitesse de cisaillement aurait une influence sur la résistance au cisaillement de la bentonite. Daniel, Shan et Anderson (1993) ont effectué des essais de cisaillement direct sur des GCB non renforcés ayant des teneurs en eau d'environ 100% et à deux vitesses différentes, soit 0,0003 mm/min et 0,26 mm/min. Ils ont observé que la résistance au cisaillement maximum à 0,0003 mm/min était équivalente à environ 50% de la valeur obtenue à 0,26 mm/min.

### **2.3 Influence des fibres dans la matrice d'argile**

L'influence des fibres de l'aiguilletage dans la matrice d'argile peut être déterminée à l'aide du schéma présenté à la figure 2.1, basé sur le modèle proposé par Gray et Ohashi (1983). Le modèle considère qu'avant l'application du cisaillement les fibres de l'aiguilletage sont perpendiculaires au plan formé par la couche de bentonite. Lorsque la force de cisaillement est appliquée, les géotextiles vont se déplacer l'un par rapport à l'autre et ainsi créer une force de traction dans les fibres. Cette force peut être séparée en deux composantes perpendiculaires l'une par rapport à l'autre, soit une force normale et une force tangentielle, qui chacune affectera la résistance au cisaillement du GCB. L'augmentation de la résistance au cisaillement des GCB provenant des fibres peut être représentée par l'équation qui suit:

$$\Delta \tau_F = T_F (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi)$$

- où  $\Delta \tau_F$  = l'augmentation de la résistance au cisaillement provenant de la présence des fibres dans la bentonite (kPa),
- $T_F$  = la force de traction appliquée sur les fibres, pour une aire de GCB donnée (kPa),
- $\theta$  = angle de distorsion causé par le cisaillement,
- $\phi$  = angle de frottement interne de la bentonite.

La composante normale de la force, soit  $T_F \cos \theta$ , augmente la contrainte normale qui est appliquée sur le plan de rupture, mobilisant ainsi une résistance au cisaillement supplémentaire, alors que la composante tangentielle, représentée par  $T_F \sin \theta$ , s'oppose directement à la force de cisaillement.

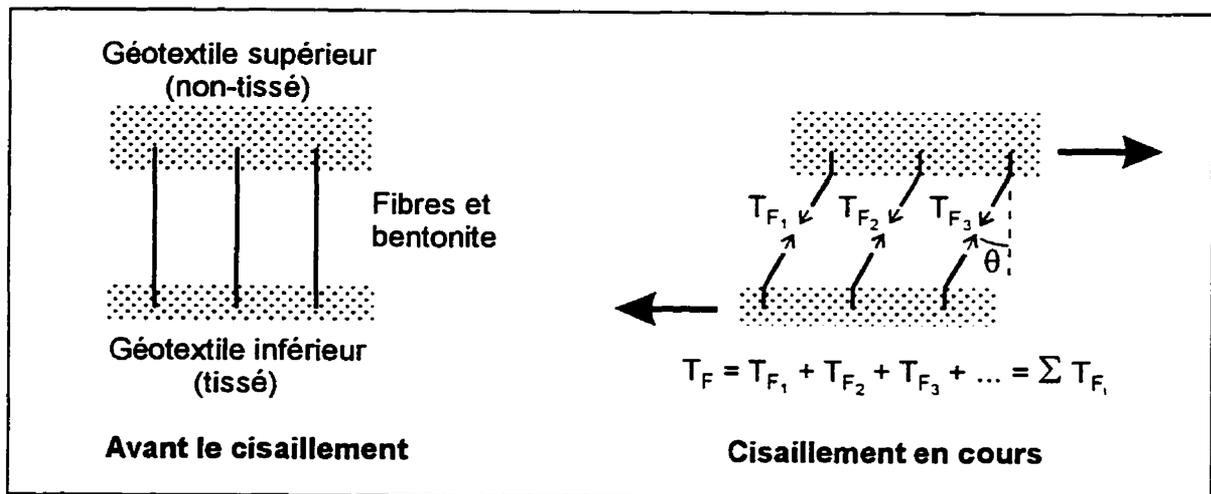


Figure 2.1 - Représentation schématique de l'influence des fibres de l'aiguilletage

En considérant que les géotextiles supérieur et inférieur sont respectivement non-tissé et tissé, la valeur maximale que pourra atteindre  $T_F$  lors d'un test de cisaillement

correspondra à la plus faible des trois composantes suivantes pouvant affecter cette valeur, soit l'ancrage des fibres dans le géotextile non-tissé, l'ancrage des fibres dans le géotextile tissé ou la résistance en traction des fibres. Étant donné la nature du géotextile non-tissé, l'ancrage des fibres y sera limité par les forces de friction qui agissent entre les fibres au sein du géotextile, ces forces augmentant avec l'accroissement de la contrainte normale.

L'ancrage des fibres dans le géotextile tissé est également relié aux forces de friction qui agissent entre les fibres de l'aiguilletage et le géotextile. Ces forces sont généralement perçues comme étant celles qui donneront les valeurs de  $T_F$  les plus faibles. C'est pour cette raison que certains fabricants de GCB ont introduit différents produits ayant subi une fusion thermique au niveau du géotextile tissé suivant l'aiguilletage, dans le but d'obtenir des valeurs de  $T_F$  au niveau de l'ancrage équivalent au  $T_F$  maximum possible, correspondant à la résistance en traction des fibres.

Une autre composante de force qui vient s'opposer à la force de cisaillement provient de la friction entre les fibres de l'aiguilletage et la bentonite. Malgré le faible diamètre des fibres (environ 60 microns, basé sur une dizaine de mesures), leur grand nombre traversant la couche de bentonite, (environ 2,5 millions), représente par exemple pour une couche de bentonite hydratée de 5 mm d'épaisseur, une surface totale de 2,35 m<sup>2</sup> par mètre carré de GCB, ou encore 0,22 m<sup>2</sup> pour un échantillon de GCB de 305 mm par 305 mm (0,09 m<sup>2</sup>). Le cisaillement ainsi créé par les forces de friction est non négligeable dans le meilleur des cas, c'est-à-dire si toutes les fibres de l'aiguilletage y participent et ce sur la pleine épaisseur de la couche de bentonite. La distribution des forces de friction peut être linéaire ou non-linéaire le long des fibres, avec probablement un point maximum situé au niveau du plan de cisaillement. Il est également possible

que seule une petite portion des fibres participe à ces forces de friction, diminuant ainsi l'importance de cette composante de force s'opposant à la force de cisaillement principale.

Ainsi, un cisaillement s'effectue le long des fibres de l'aiguilletage lors du déplacement relatif des deux géotextiles du GCB. Cependant, l'influence exacte du frottement bentonite-polypropylène sur le cisaillement interne d'un GCB ne fait pas l'objet de la présente étude. De plus, cette influence sera pratiquement la même d'un échantillon de GCB à l'autre, la variation principale étant l'épaisseur de la couche de bentonite hydratée. L'effet de cette influence ne sera pas isolé mais plutôt incorporé dans l'analyse des autres paramètres.

Finalement, la force de traction maximum que peuvent subir les fibres de l'aiguilletage peut être caractérisée à l'aide de l'essai de pelage. Cet essai permet de mesurer la résistance offerte par les fibres de l'aiguilletage lorsque les deux géotextiles sont écartés l'un de l'autre (pelés) à vitesse constante à l'aide d'un appareil spécialement conçu pour cette tâche.

L'essai de pelage se rapproche donc du test de cisaillement direct en ce sens qu'il mobilise les fibres de l'aiguilletage par un effort de traction. Cependant, l'essai de pelage ne subit pas les effets que la contrainte normale ou la bentonite peut avoir sur les fibres lors du test de cisaillement direct. De plus, l'essai de pelage ne mobilise qu'une section de l'échantillon en tout temps, alors que le cisaillement direct mobilise l'ensemble de l'échantillon de GCB.

## **2.4 Conditions d'utilisation**

### **2.4.1 Teneurs en eau**

À sa sortie d'usine, la bentonite comprise dans le rouleau de GCB a une teneur en eau d'environ 10% et est considérée comme étant à l'état sec. Dès que le GCB est mis en place, la bentonite absorbe l'humidité comprise dans les sols avoisinants. Par la suite, selon que le GCB soit mis en contact direct avec de l'eau ou non, ainsi que selon la contrainte normale appliquée, la teneur en eau de la bentonite variera beaucoup. La teneur en eau maximum sera atteinte lorsque la contrainte normale sera faible et l'apport en eau important, par exemple peu de temps après l'installation du GCB alors que celui-ci est couvert d'une couche de sol relativement mince et qu'il est rapidement hydraté par de l'eau de pluie.

Par définition, lorsque tous les vides compris dans un sol sont remplis d'eau, le degré de saturation est de 100%. Aucune mesure n'a été effectuée dans le but de déterminer le degré de saturation de la bentonite. Le contrôle de la quantité d'eau adsorbée par les particules d'argile est effectué en variant le temps d'exposition de l'argile avec l'eau (à pression ambiante), soit le temps d'hydratation. Après un certain temps d'hydratation la teneur en eau de la bentonite ne semble plus varier, ce qui permet d'obtenir une teneur en eau maximale alors que l'échantillon de GCB est submergé dans un bassin et qu'une contrainte normale est appliquée. Dans ces conditions le degré de saturation de la bentonite est fort probablement inférieur à 100%, étant donné que les vides de la matrice d'argile peuvent encore contenir de l'air, cependant la teneur en eau obtenue en laboratoire est représentative des conditions pouvant exister sur le terrain.

À une teneur en eau de la bentonite supérieure à celle correspondant à la limite de retrait sera associée une augmentation de volume. Toujours en présence d'eau, le volume total de la bentonite augmentera pour dépasser la limite de plasticité, jusqu'à atteindre la limite de liquidité. À ce point la bentonite n'a plus à proprement parler de résistance au cisaillement mesurable et se comporte comme un liquide visqueux. Mitchell (1993) donne une teneur en eau d'environ 330% correspondant à la limite de liquidité moyenne pour la bentonite, cette valeur pouvant varier selon le type de bentonite utilisé.

Au cours de l'hydratation de la bentonite comprise dans le GCB, le gonflement de celle-ci sera limité soit par la contrainte normale appliquée, soit par l'espace restreint entre les géotextiles confinant la bentonite, espace limité par la longueur des fibres de l'aiguilletage reliant les deux géotextiles. Il a été déterminé par Shan en 1990 que la pression devant être appliquée, afin d'obtenir une variation de volume nulle lors de l'hydratation d'un échantillon de bentonite de sodium avec de l'eau du robinet, était d'environ 135 kPa.

La bentonite hydratée sous une contrainte normale et cisailée avec la même contrainte est considérée comme étant normalement consolidée. Cependant, lorsque l'hydratation se fait à l'état libre (contrainte normale nulle) et qu'une contrainte est appliquée au moment du cisaillement, la bentonite se trouve être dans un état sous-consolidé, c'est-à-dire que des tassements seront générés et que les pressions interstitielles dans la bentonite dépassent les pressions hydrostatiques. Ces pressions s'ajouteront à celles créées lorsque le cisaillement se fera en conditions non-drainées, diminuant d'autant la résistance au cisaillement interne maximale et résiduelle des GCB.

Pour des conditions d'essai similaires, la résistance au cisaillement interne des GCB devrait diminuer avec l'augmentation de la teneur en eau de la bentonite, étant donné que l'eau adsorbée par les molécules d'argile augmente la facilité à déplacer celles-ci les unes par rapport aux autres. Cependant, la présence de l'aiguilletage devrait réduire l'influence de cet effet sur la résistance au cisaillement interne des GCB.

De plus, Koerner (1994) a procédé à des essais de cisaillement interne sur des GCB hydratés avec différents liquides, notamment de l'eau du robinet et de l'eau distillée. Les échantillons hydratés avec de l'eau distillée ont tous donné des résistances au cisaillement inférieures à celles obtenues avec les autres liquides. L'eau distillée a été utilisée pour la présente étude étant donné que les résultats obtenus devraient être plus conservateurs. Également, l'utilisation d'un liquide unique, soit l'eau distillée, facilite le développement d'un test standard étant donné sa grande disponibilité ainsi que par l'élimination de certaines variables pouvant être introduites en utilisant de l'eau du robinet, de qualité et de composition variant d'un endroit à l'autre.

#### **2.4.2 Contraintes normales**

Selon l'utilisation des GCB, les contraintes normales appliquées pourront varier. Par exemple, considérant que la densité des déchets dans un site d'enfouissement commercial peut varier entre 10 et 13.8 kN/m<sup>3</sup> (d'après Frobel et Taylor, 1991), une couche de 10 mètres de déchets générera des pressions à la base variant entre 100 et 138 kPa. Bien que des contraintes plusieurs fois supérieures peuvent être appliquées sur les GCB, ces fortes pressions sont difficiles à reproduire en laboratoire d'autant plus que les échantillons testés ont une surface relativement importante.

### 2.4.3 Vitesse de cisaillement

Afin de préserver l'intégrité d'un ouvrage, le cisaillement interne des GCB utilisés devrait être très lent et avoir pour effet le fluage de la bentonite et des fibres de l'aiguilletage, plutôt que la rupture de ces derniers. La vitesse de cisaillement sera directement influencée par les contraintes normales appliquées, qui elles-mêmes peuvent varier dans le temps, ainsi que par l'angle du plan du GCB par rapport aux charges verticales appliquées. Ainsi, l'utilisation en laboratoire de différentes vitesses de cisaillement peut permettre de déterminer si celles-ci ont une influence significative sur la résistance au cisaillement interne des GCB.

Cependant, la vitesse de cisaillement choisie fera en sorte que le test sera fait selon l'une ou l'autre condition, soit drainée ou non-drainée. La distinction est importante car si en condition non-drainée, l'analyse de la rupture devra être faite en considérant les contraintes totales, c'est-à-dire en ne différenciant pas les contraintes effectives des pressions interstitielles, alors que la condition drainée sera faite en considérant les contraintes effectives uniquement, les pressions interstitielles générées au cours de l'essai étant théoriquement nulles.

La vitesse maximale permise afin d'obtenir la dissipation complète des pressions interstitielles par le cisaillement peut être estimée par la norme ASTM D3080-90, en déterminant le temps requis pour obtenir 50% de la consolidation primaire d'un échantillon de bentonite soumis à une contrainte donnée et en estimant le déplacement requis pour obtenir la rupture du sol. Cette vitesse a été estimée à 0,0002 mm/min par Gilbert, Fernandez et Horsfield (1996) pour une bentonite de sodium soumise à une contrainte de 69 kPa.

#### **2.4.4 État submergé et non-submergé**

Les échantillons de GCB sont généralement submergés lors de l'hydratation et non-submergés lors de l'essai de cisaillement direct. Le changement de milieu causé par l'enlèvement du bassin d'hydratation fera en sorte que les pressions interstitielles en surface de la bentonite deviendront équivalentes ou inférieures (celles-ci pouvant être négatives) à la pression atmosphérique, alors que les pressions interstitielles à l'intérieur de la matrice de bentonite resteront plus élevées. Ces pressions plus élevées sont dues au fait que la hauteur d'eau dans le bassin d'hydratation est de quelques centimètres (environ de 2 à 4 cm) au-dessus de la couche de bentonite, créant ainsi une pression hydrostatique, et de façon encore plus importante, par les pressions internes générées lors de l'hydratation de la bentonite (adsorption des molécules d'eau) tout en étant confinée dans le GCB et soumise à une contrainte normale.

Les pressions plus faibles en surface devraient faire augmenter la résistance au cisaillement direct du GCB, étant donné qu'une petite section de l'échantillon correspondant au périmètre de celui-ci est en condition drainée, contrairement au reste de la bentonite. Les tests de cisaillement direct devraient donc être faits en submergeant les échantillons afin de ne pas affecter les pressions interstitielles dans la bentonite.

#### **2.5 Paramètres étudiés**

Les paramètres étudiés par cette étude et ayant une influence sur la résistance au cisaillement maximum de différents GCB sont la teneur en eau de la bentonite et la vitesse de cisaillement, pour différentes contraintes normales appliquées. L'influence

de la submersion lors du cisaillement des GCB sera également étudiée, ainsi que l'influence de l'hydratation des GCB effectuée avec ou sans contrainte normale.

## **CHAPITRE III**

### **MÉTHODE EXPÉRIMENTALE**

#### **3.1 Généralités**

Les différentes méthodes expérimentales décrites dans ce chapitre permettent de déterminer certaines propriétés des GCB ainsi que de la bentonite qui les compose. La norme ASTM D 5321-92 servant à déterminer l'angle de friction entre un sol et un géosynthétique ou entre deux géosynthétiques fut utilisée comme référence de base, notamment quant à l'utilisation d'une boîte de cisaillement de 305 mm par 305 mm (12 pouces par 12 pouces). Cependant, cette norme n'a pas été conçue pour les GCB mais plutôt pour les géosynthétiques en général; il a donc fallu y apporter certaines modifications.

#### **3.2 Description des produits testés**

Six différents groupes d'échantillons de GCB ont été testés, numérotés de 1 à 6. Tous les échantillons utilisés possédaient un géotextile supérieur non-tissé et un géotextile inférieur tissé. Divers paramètres ont été mesurés afin de différencier les divers groupes, soit la résistance au pelage, l'épaisseur et la masse surfacique à l'état sec. Également, des tests de gonflement de la bentonite ont été effectués dans le but de vérifier rapidement la similitude entre des échantillons de bentonite provenant de différents groupes de GCB. Les fibres des géotextiles non-tissés, responsables de l'aiguilletage des GCB, étaient toutes constituées de polypropylène. L'épaisseur des GCB a été mesurée selon la norme ASTM D5199.

L'essai de pelage effectué sur des échantillons de chaque groupe a permis de les différencier quant à leur résistance pour défaire ou briser les fibres qui ont été aiguilletées. Malgré les différences qui existent entre l'essai de pelage et le test de cisaillement direct, un GCB ayant une résistance au pelage supérieure à un autre devrait également avoir une résistance au cisaillement supérieure pour des conditions identiques.

La bentonite de chaque groupe est la même; des tests de gonflements ont été effectués afin de permettre une vérification rapide. La couleur de la bentonite varie de gris à brun pâle, mais cela peut être attribué à la présence ou à l'absence de certaines impuretés qui ne devraient pas affecter le comportement de la bentonite. La bentonite est identifiée comme une bentonite de sodium en poudre de type Volclay SPV 200.

Les échantillons des groupes 4, 5 et 6 sont identiques aux échantillons des groupes 1, 2 et 3, avec en plus un traitement thermique appliqué en usine afin de souder les fibres aiguilletées au géotextile inférieur qui les retient. La densité des fibres de l'aiguilletage devant être sensiblement la même entre chaque groupe (ce paramètre n'est pas modifié en usine), le type de géotextile servant d'ancrage est donc le principal élément qui crée une variation entre les tests de pelage. Par exemple, un géotextile tissé serré donnera une résistance plus grande qu'un géotextile à mailles plus lâches.

### **3.3 Conditions d'essais**

Les différentes conditions d'essais utilisées ainsi que le nombre d'essais effectués sur l'ensemble des échantillons de GCB se trouvent au tableau 3.1 de la page suivante.

**Tableau 3.1 - Nombre d'essais de cisaillement direct effectués sur l'ensemble des échantillons de GCB, selon différentes conditions d'essais.**

Note: H = heure, J = jour

| Vitesse<br>(mm/min) | Hydratation<br>(durée)   | Contrainte normale |        |         |
|---------------------|--------------------------|--------------------|--------|---------|
|                     |                          | 25 kPa             | 50 kPa | 100 kPa |
| 1                   | Sec                      | 3                  | 3      | 3       |
|                     | 2 H                      | 3                  | 3      | 3       |
|                     | 14 H                     | 6                  | 6      | 6       |
|                     | 14 H<br>submergé         | 3                  | 3      | 3       |
|                     | 48 H                     | 3                  | 3      | 3       |
|                     | >14 J                    | 6                  | 6      | 6       |
|                     | >14 J<br>sans contrainte | 3                  | 3      | 3       |
| 0,1                 | 14 H                     | 6                  | 6      | 6       |
|                     | >14 J                    | 5                  | 5      | 6       |
| 0,01                | >14 J                    | 3                  | 3      | 4       |

Des contraintes normales de 25, 50 et 100 kPa, choisies pour cette étude, veulent couvrir une plage de pressions sous lesquelles des GCB peuvent être réellement soumises, tout en étant facilement applicable et contrôlable en laboratoire. De plus, ces contraintes devraient se retrouver sur une partie relativement linéaire de l'enveloppe de rupture de Mohr, permettant une bonne coïncidence avec l'enveloppe de Mohr-Coulomb.

Pour des raisons d'ordre pratique, des vitesses de 1, 0,1 et 0,01 mm/min ont été utilisées pour la présente étude, correspondant à des conditions de cisaillement non-drainées pour les trois vitesses.

Afin de vérifier l'influence de la teneur en eau sur la résistance au cisaillement de différents GCB, ceux-ci seront premièrement testés à l'état sec, cas où la résistance devrait être maximale, étant donné une plus grande interaction (friction) entre les particules d'argile. Ensuite, différentes teneurs en eau seront obtenues en appliquant une contrainte connue et en faisant varier le temps d'hydratation des échantillons. Ainsi, des temps d'hydratation de quelques heures à plus de 14 jours permettront, selon la contrainte normale appliquée lors de l'hydratation, d'obtenir des teneurs en eau situées entre l'état sec et environ 300%, cette dernière valeur pouvant être atteinte alors qu'aucune contrainte normale n'est appliquée lors de l'hydratation du GCB.

La plupart des essais de cisaillement direct ont été effectués sans être submergés, étant donné les divers problèmes pouvant survenir au cours de l'essai de cisaillement en ayant un bassin d'eau assez grand pour pouvoir contenir les boîtes de cisaillement. Néanmoins, quelques séries d'essais ont été effectuées en condition submergée afin de quantifier l'influence de la présence, ou de l'absence, de submersion au cours de l'essai de cisaillement direct d'un GCB.

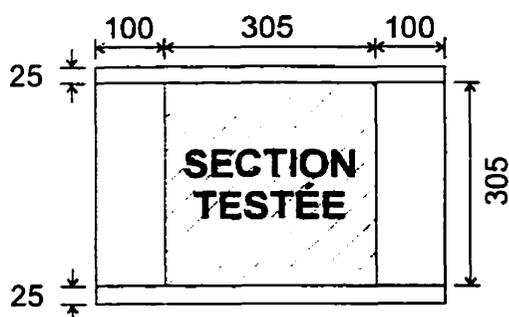
### **3.4 Appareillage et procédures**

#### **3.4.1 Préparation des échantillons de GCB**

Chaque échantillon testé est taillé à même un échantillon plus grand correspondant à une section de rouleau de GCB fournie par le fabricant. Le sens de fabrication doit être respecté, c'est-à-dire que les échantillons sont cisailés dans la longueur du rouleau, correspondant ainsi au mode de sollicitation que le GCB subit lorsqu'il est installé sur un talus. En effet, il est plus facile d'installer le GCB en le déroulant du haut

vers le bas, plutôt que transversalement à la pente. De plus, les joints entre chaque section de GCB sont de cette façon beaucoup moins sollicités et l'intégrité de l'ouvrage est plus facile à assurer.

Chaque échantillon mesure 508 mm de long par 355 mm de large ajoutant ainsi à la section testée de 305 mm par 305 mm une extension en longueur de 100 mm à chaque bout afin de fixer chacun des géotextiles à sa boîte respective (inférieure ou supérieure). Également, une surlargeur de 25 mm située de chaque côté de l'échantillon, enlevée au moment de faire le test de cisaillement, permet de diminuer les risques de pertes de bentonite lors des différentes manipulations, ainsi que d'avoir une bentonite plus homogène sur le périmètre du GCB au moment de tester celui-ci. Un exemple d'échantillon taillé se trouve aux figures 3.1 et 3.2.



Note: Les dimensions sont données en millimètre.

Figure 3.1 - Schéma d'un échantillon de GCB avec lignes guides

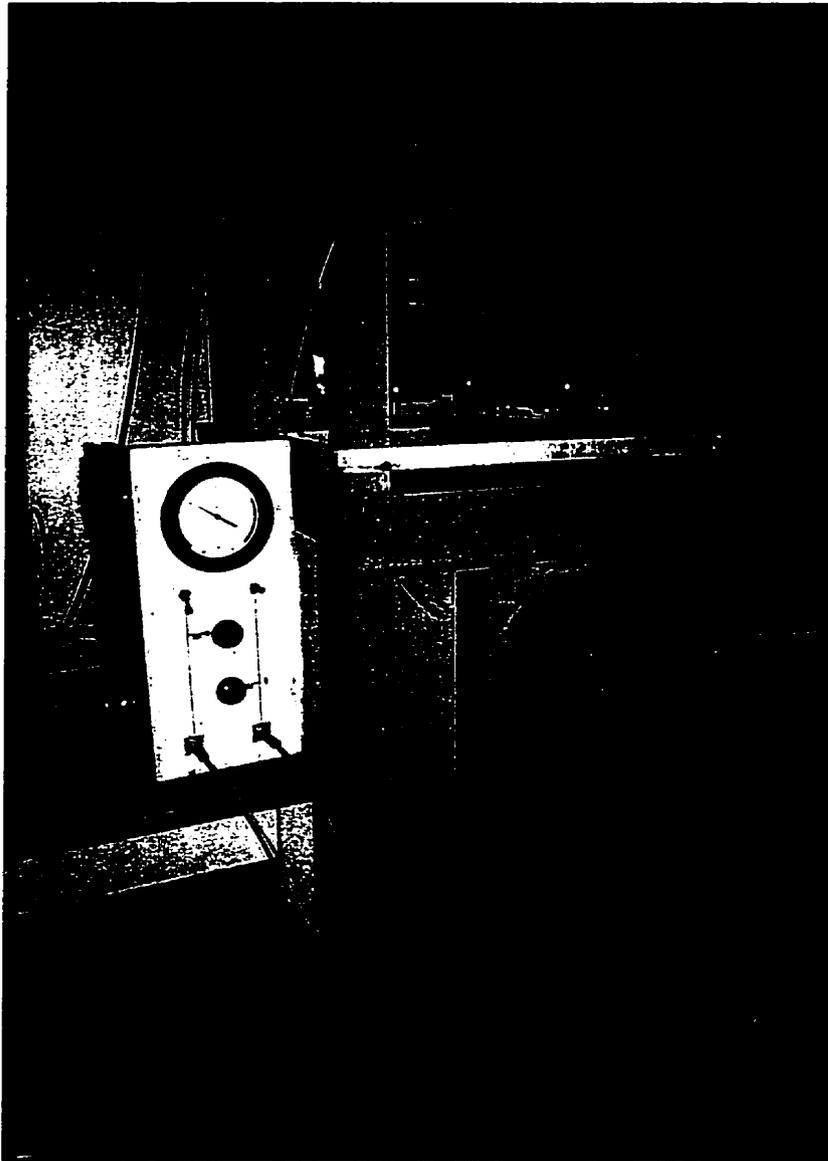


**Figure 3.2 - Échantillons de GCB avec le gabarit utilisé pour les tailler**

### **3.4.2 Hydratation des GCB**

Un banc de chargement constitué d'une structure métallique, de quatre pistons hydrauliques ainsi que d'une plate-forme permet d'hydrater les échantillons de GCB tout en appliquant une contrainte constante (voir figure 3.3). De plus, deux séries de disques métalliques de diamètres et de poids variables sont utilisées comme charges

mortes afin d'hydrater des échantillons de GCB soumis à une pression relativement faible, soit 25 kPa. Les disques reposent sur le sol où un polythène est placé au préalable afin de contenir l'eau distillée servant à hydrater les échantillons. Ce montage a pour but de libérer les pistons du banc de chargement qui est utilisé principalement pour les pressions plus élevées, soit 50 et 100 kPa.



**Figure 3.3 - Banc de chargement principal servant à hydrater les échantillons de GCB.**

Avant d'hydrater l'échantillon de GCB, celui-ci est pelé à chaque bout sur une longueur d'environ 75 mm, ce qui permet de briser les liens de l'aiguilletage et ainsi enlever toute la bentonite qui s'y trouve immobilisée. Ceci a pour but de faciliter les opérations à venir et à limiter au minimum la manipulation de bentonite hydratée. De plus, des conditions semblables au moment de l'hydratation sont ainsi assurées sur tout le périmètre de l'échantillon, grâce à cette bande d'environ 25 mm de GCB laissée intacte se trouvant sur chacun des quatre côtés.

Chaque échantillon est ensuite placé sous un piston hydraulique afin d'être chargé, le géotextile tissé vers le haut. Sous l'échantillon se trouve un grillage fin (géogrille style moustiquaire) servant comme drain horizontal sous le géotextile non tissé, ainsi qu'un polythène servant à créer un bassin étanche. Une fois l'échantillon en place, un grillage fin est placé sur le géotextile non-tissé, puis un bloc de bois aux dimensions de la section testée (305 par 305 mm) et de 37 mm d'épaisseur vient reposer sur la surface de l'échantillon qui sera cisailée plus tard. Des lignes guides tracées au préalable sur l'échantillon assurent le bon emplacement de la contrainte sur le GCB. Une plaque métallique d'environ 100 mm par 100 mm est placée au milieu du bloc de bois afin de prévenir l'enfoncement du piston hydraulique dans le bois, en plus d'offrir une meilleure distribution de la contrainte appliquée. Le sandwich ainsi créé est ensuite centré sous le piston afin d'assurer une distribution uniforme de la contrainte.

Juste avant d'appliquer la contrainte, l'échantillon est submergé avec de l'eau distillée, afin de bien humidifier les deux faces du GCB et éviter d'avoir de grosses bulles d'air coincées contre l'un des géotextiles. La contrainte prédéterminée est ensuite appliquée. Le niveau d'eau distillée doit être maintenu afin d'assurer une bonne submersion de l'échantillon. La durée entre le moment où l'échantillon entre en contact avec l'eau et

celui où la contrainte est appliquée n'est que de quelques secondes, temps trop court pour affecter la teneur en eau finale de la bentonite après le cisaillement de l'échantillon.

Lorsque l'hydratation de l'échantillon est complétée et que le moment est venu de le cisailer, il faut tout d'abord enlever l'eau du bassin dans lequel baigne le GCB. Ensuite, il faut purger l'air du piston, ce qui éliminera la contrainte normale, avant d'enlever la plaque métallique et le bloc de bois reposant sur l'échantillon. Ce dernier peut ensuite être enlevé de la plate-forme sur laquelle il repose avant d'être cisailé.

### **3.4.3 Cisaillement des GCB**

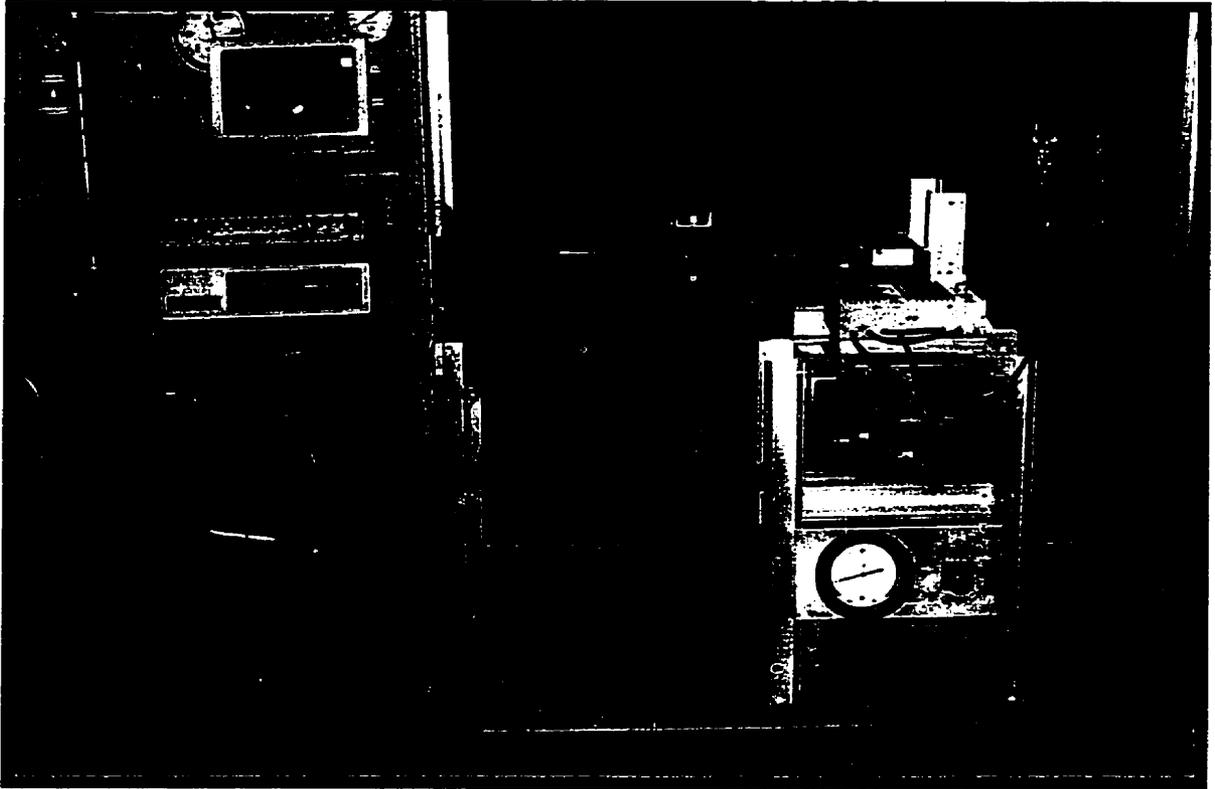
Les boîtes supérieures et inférieures servant au cisaillement ont été remplies de béton, puis une couche de sable abrasif (St-Canut, numéro 10) fut collée à l'aide d'époxy sur les deux faces entrant en contact avec le GCB. Ceci permet d'avoir une bonne adhésion entre les boîtes et les deux géotextiles de l'échantillon, mobilisant ainsi celui-ci sur toute sa longueur lors de l'essai de résistance au cisaillement. La boîte supérieure, qui est immobile lors de l'essai, possède une surface ainsi fabriquée de 305 mm par 305 mm, ce qui correspond à la surface intacte de l'échantillon testé. La boîte inférieure, se déplaçant au cours de l'essai, a une surface rugueuse de 305 mm par 460 mm, permettant ainsi d'avoir en tout temps une bonne adhésion entre la boîte et l'échantillon. Un système de fixation situé sur chaque boîte permet d'accrocher les géotextiles du GCB afin de bien assurer la solidarité entre ceux-ci et les boîtes de cisaillement.

Deux systèmes sont utilisés afin d'obtenir des vitesses de cisaillement différentes. Le premier, qui consiste en un moteur électrique relié à un régulateur de vitesse, permet à l'aide d'engrenages d'actionner horizontalement une vis venant s'appuyer contre la boîte

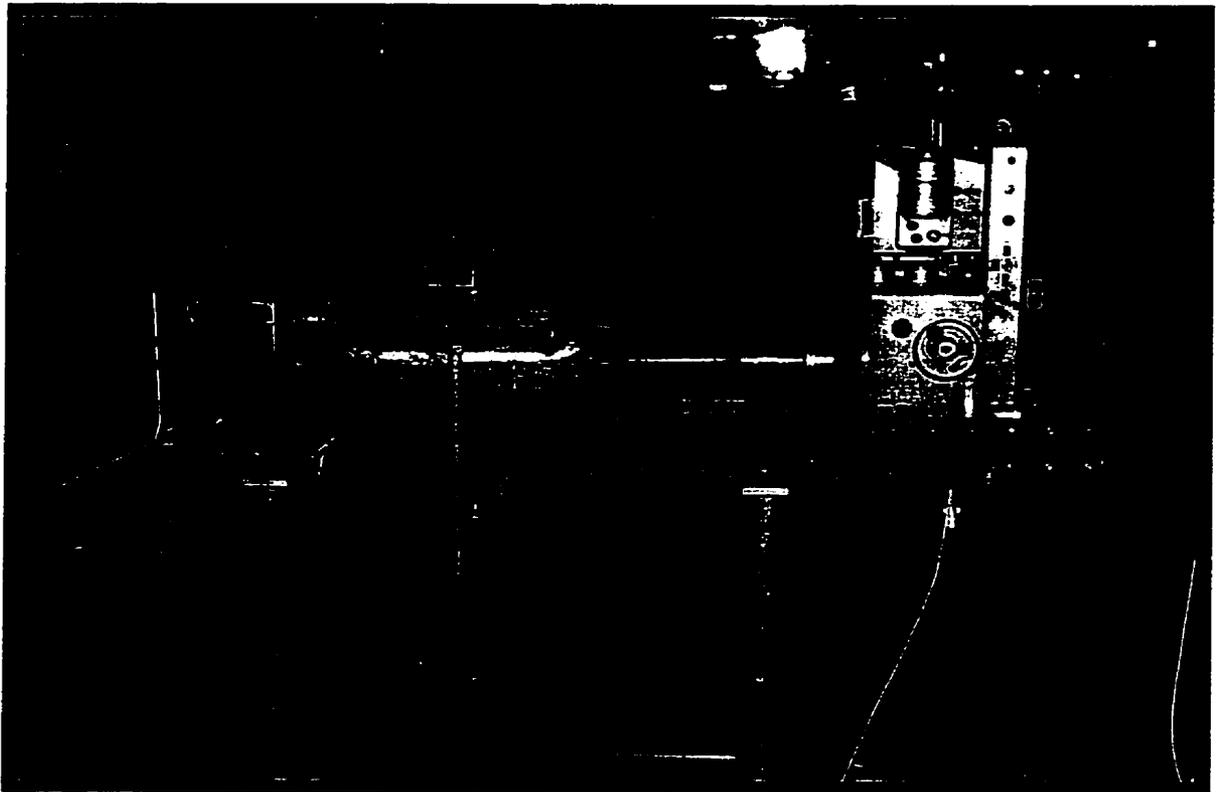
inférieure qui est mobile. Le second, consistant en une presse hydraulique couchée à l'horizontale sur un support métallique, permet à son piston de s'appuyer également contre la boîte inférieure du montage. Dans chacun des cas, la boîte inférieure repose sur un roulement à bille permettant le libre déplacement de celle-ci, alors qu'un butoir fixe est installé à l'opposé du système mécanique afin d'y appuyer la boîte supérieure et ainsi créer le cisaillement au sein de l'échantillon de GCB. Les figures 3.4, 3.5 et 3.6 montrent respectivement une image de chaque système ainsi qu'une vue rapprochée de la boîte de cisaillement avec l'échantillon de GCB. Les vitesses générées sont respectivement de l'ordre de 1 mm/min pour le premier montage et de 0,1 et 0,01 mm/min pour le second.

Chaque système utilise un piston hydraulique semblable à ceux utilisés pour l'hydratation afin d'appliquer une contrainte normale sur l'échantillon lors du cisaillement. Un manodétendeur couplé avec une jauge de pression permet de contrôler la charge qui est appliquée par le piston.

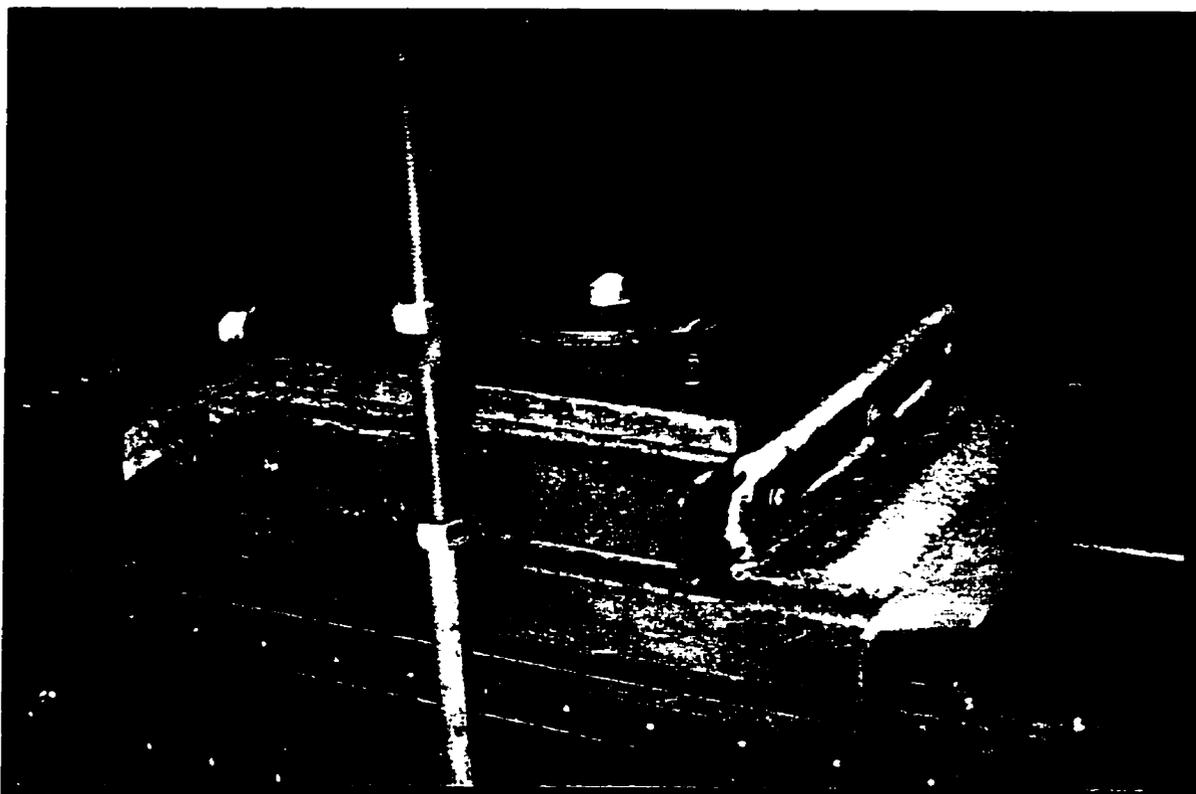
Un premier capteur de charge situé sur la boîte de cisaillement permet de mesurer la charge normale qui est appliquée sur l'échantillon. Un deuxième capteur de charge situé entre le butoir et la boîte de cisaillement supérieure permet de mesurer la résistance au cisaillement direct de l'échantillon testé. Finalement, un capteur de déplacement fixé à un cadre rigide et accroché à la boîte inférieure permet de mesurer le déplacement horizontal de celle-ci. Les trois capteurs sont reliés à un système d'acquisition de données qui permet d'enregistrer à intervalle prédéterminé les données mesurées par ceux-ci, ainsi que de traiter ces données et de les afficher en temps réel. Les fichiers créés de la sorte sont ensuite utilisés pour faire une analyse plus détaillée des résultats obtenus.



**Figure 3.4 - Photo du montage pour cisailer à 1 mm/min (test en cours).**



**Figure 3.5 - Photo du montage pour cisailer à 0,1 et 0,01 mm/min (test complété).**

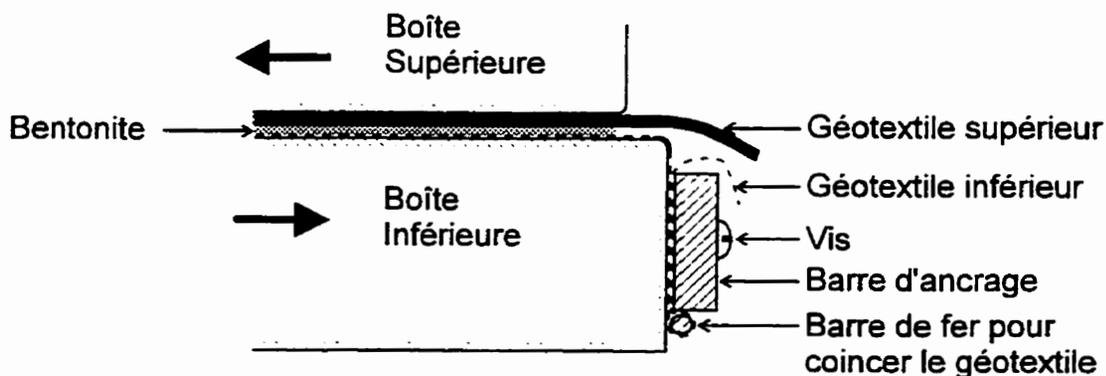


**Figure 3.6 - Boîte de cisaillement avec échantillon de GCB.**

Une fois l'hydratation de l'échantillon de GCB complétée, celui-ci peut être préparé afin d'être cisailé. À l'aide d'un couteau bien aiguisé, il faut tout d'abord enlever les deux bandelettes de GCB de 25 mm se trouvant de chaque côté de l'échantillon et ensuite peler chaque bout de l'échantillon sur une longueur approximative de 25 mm. L'échantillon de GCB est maintenant constitué d'une surface intacte et hydratée d'environ 305 par 305 mm, ainsi que d'un prolongement d'environ 100 mm des deux géotextiles à chaque bout de l'échantillon.

L'échantillon doit ensuite être placé sur la boîte de cisaillement inférieure, le géotextile tissé vers le bas. Un schéma montrant le système d'attache du géotextile inférieur se trouve à la figure 3.7; un système identique est utilisé pour attacher le géotextile supérieur à la boîte supérieure. Également, afin de faciliter l'installation des trois vis

servant à retenir la barre d'ancrage, un poinçon est utilisé pour percer le géotextile vis-à-vis des trous prévus pour celles-ci.



**Figure 3.7 - Schéma du système d'attache d'un géotextile sur la boîte de cisaillement inférieure**

Une fois le GCB fixé sur la boîte de cisaillement inférieure, celle-ci est installée sur le banc de cisaillement en prenant soin de bien la centrer sur les rails servant à son déplacement, le bout ancré du GCB étant dirigé dans le sens du déplacement. La boîte supérieure peut maintenant reposer sur le GCB, en prenant soin de bien couvrir la partie intacte de l'échantillon. Il faut maintenant attacher le géotextile supérieur (non tissé) à la boîte supérieure. Pour faciliter l'installation des vis servant à retenir la barre d'ancrage, une pointe métallique rougie par la flamme d'une torche au butane est utilisée afin de percer le géotextile vis-à-vis des trous prévus pour celles-ci.

L'échantillon de GCB étant maintenant fixé aux deux sections de la boîte de cisaillement, la boîte inférieure doit venir s'appuyer contre le piston qui servira à la déplacer. Le piston est actionné doucement, afin de permettre à l'ensemble de se déplacer suffisamment sur les rails pour que la boîte supérieure exerce une légère pression contre la butée, où se trouve un capteur de charge qui servira à mesurer la

résistance au cisaillement en cours d'essai. Le capteur servant à mesurer le déplacement horizontal de la boîte inférieure peut également être accroché à celle-ci.

La contrainte normale doit maintenant être appliquée. Pour ce faire, une plaque métallique de 300 mm par 300 mm vient reposer sur la boîte supérieure, directement au-dessus de la section d'échantillon devant être testée. Une plaque métallique circulaire de 120 mm de diamètre est placée au centre de la plaque précédente. Un capteur de charge servant à mesurer la charge normale appliquée est ensuite placé au centre du montage. Une poutrelle d'acier utilisée pour transmettre la charge du piston à la boîte de cisaillement, grâce à des tiges d'acier situées de part et d'autre du montage, vient reposer directement sur le capteur de charge, en prenant soin de bien y centrer celle-ci tout en la gardant horizontale.

Une fois le montage terminé, la contrainte normale peut être appliquée et le système d'acquisition de données activé avant de pouvoir commencer le cisaillement de l'échantillon. La charge appliquée par le piston tient compte du fait que le poids de la boîte supérieure et des plaques d'acier interviennent dans l'application de la contrainte normale sur le GCB.

L'ensemble des opérations, à partir du moment où l'échantillon est enlevé du montage servant à l'hydrater jusqu'à ce que la contrainte normale soit appliquée sur la boîte de cisaillement, doit être exécuté dans les plus brefs délais, afin de limiter autant que possible toute variation physique de l'échantillon qui se trouve soudainement déchargé et en présence d'eau. Un temps d'exécution allant de 15 à 20 minutes peut être facilement respecté si la démarche décrite précédemment est suivie.

Pour les essais de cisaillement exécutés en conditions submergées, un petit bassin construit à l'aide d'une polythène permet de maintenir le niveau d'eau au-dessus de l'échantillon, en prenant bien soin de ne pas nuire au déplacement de la boîte inférieure. Le bassin doit être rempli d'eau distillée dès que la contrainte normale est appliquée.

Lors des essais de cisaillement effectués à 0,1 et 0,01 mm/min, un papier absorbant humide est placé de chaque côté du GCB afin de prévenir les pertes d'humidité. De plus, une pellicule plastique est placée autour des deux boîtes de cisaillement lorsque la vitesse est de 0,01 mm/min, en s'assurant que celle-ci n'affecte pas les mesures de résistance au cisaillement obtenues.

La norme ASTM D 5321-92, servant à déterminer l'angle de friction entre un sol et un géosynthétique ou entre deux géosynthétiques, spécifie que la résistance au cisaillement doit être mesurée sur un déplacement minimum de la boîte mobile de 50 mm. Cependant, une valeur minimale de 60 mm est utilisée afin d'augmenter les chances d'obtenir une valeur de résistance au cisaillement résiduelle, la limite inférieure de l'ASTM étant jugée insuffisante pour les présents essais.

#### **3.4.4 Teneur en eau des GCB**

Lorsque le cisaillement de l'échantillon de GCB est complété, celui-ci doit être retiré de la boîte de cisaillement afin de procéder à la mesure de la teneur en eau de la bentonite. Une fois le GCB retiré de la boîte, les deux géotextiles sont écartés afin d'exposer la bentonite et de permettre l'évaluation visuelle de l'état des fibres de l'aiguilletage. La bentonite est prélevée du GCB à l'aide d'une petite spatule métallique, en faisant de 5 à 8 sillons parallèles sur la pleine longueur de la section où la bentonite

est exposée. Les sillons seront également espacés afin de couvrir la plus grande superficie possible, en prenant soin de ne pas prélever de bentonite trop près du bord. Un échantillon composite d'environ 50 à 60 grammes de bentonite humide est ainsi créé, avant d'être placé dans un four à 110°C pour une durée de 24 heures tel que décrit dans la norme ASTM D 2216-92.

### **3.4.5 Cisaillement de la bentonite**

La bentonite est également testée indépendamment des géotextiles à l'aide d'une boîte de cisaillement direct de 60 par 60 mm. La norme ASTM D3080-90 spécifie les procédures à suivre pour réaliser cet essai. La bentonite utilisée a été fournie par le fabricant des GCB et correspond à la bentonite qui se trouve dans les GCB, soit une bentonite de sodium en poudre de type Volclay SPV 200.

La bentonite doit être hydratée avec de l'eau distillée avant d'être cisailée, afin de reproduire des conditions semblables à celles existantes lors du cisaillement des GCB. L'épaisseur de bentonite utilisée pour cet essai, dans l'axe perpendiculaire au plan de cisaillement, est supérieure à celle existante dans un échantillon de GCB. Le temps requis pour hydrater la bentonite ne correspond donc plus au temps utilisé pour les GCB. Un indicateur de déplacement vertical est donc utilisé au cours de l'hydratation de la bentonite afin de mesurer le gonflement de celle-ci. Lorsque le taux de gonflement devient nul, la bentonite est alors cisailée à une vitesse s'approchant de 1,0 mm par minute (0,91 mm/min). Les contraintes normales sont de 25, 50 et 100 kPa et la bentonite est cisailée en conditions submergées. Une fois le cisaillement terminé, un échantillon de bentonite est prélevé afin d'en déterminer la teneur en eau.

### **3.4.6 Hydratation des GCB à l'oedomètre**

Afin de déterminer le temps requis pour hydrater les échantillons de GCB à différentes teneurs en eau, de petits échantillons circulaires de 64 mm de diamètre sont placés dans un oedomètre. Les échantillons sont alors chargés, puis de l'eau distillée est ajoutée afin de les submerger. Le gonflement de chaque GCB est alors mesuré, soit jusqu'à ce que le déplacement vertical ne soit plus perceptible, ou bien soit pour une durée prédéterminée. La première option permet de déterminer le temps requis pour obtenir une hydratation optimale (dans le sens quantitatif du terme), alors que la seconde option nous permet de déterminer le temps requis pour obtenir une teneur en eau située entre l'état sec et l'état d'hydratation optimale. Quelle que soit l'option, l'échantillon est à ce point retiré de l'oedomètre, puis une mesure de la teneur en eau de la bentonite est alors effectuée.

### **3.4.7 Caractérisation de la bentonite (gonflement)**

Des tests de gonflement de bentonites provenant de divers échantillons de GCB permettent de vérifier si en présence d'eau celles-ci gonflent de façon relativement semblable. Dans le cas contraire, il faudrait évaluer l'influence de ce paramètre sur les valeurs obtenues de résistance au cisaillement. Ces tests ne sont utilisés que pour fins de comparaisons; des échantillons de bentonite de minéralogie semblable devraient donner des résultats de gonflement similaires.

La méthode utilisée est celle du U.S. Pharmacopeial Convention, Inc.. Cette méthode permet de caractériser le gonflement de la bentonite à l'état libre. Le test consiste à remplir un cylindre gradué de 100 ml avec de l'eau distillée, puis d'y ajouter un total de 2

grammes de bentonite par petites quantités afin de permettre à celles-ci de bien s'imprégner d'eau et de se déposer au fond du cylindre. Lorsque les 2 grammes ont ainsi été déposés au fond du cylindre gradué, il faut attendre 24 heures avant de faire une lecture du gonflement de la bentonite, la lecture étant faite sur l'échelle du contenant.

### **3.4.8 Test de pelage**

Le test de pelage est fait selon la norme ASTM D4437(D413)NSF54 qui est présentement en voie de développement par le comité d'étude D35.04 de l'ASTM. Ce test permet de mesurer la résistance offerte par les fibres de l'aiguilletage lorsque les deux géotextiles sont écartés l'un de l'autre (pelés) à l'aide d'un appareil spécialement conçu pour cette tâche. Les tests de pelage ont été effectués par une firme spécialisée de Saint-Hyacinthe possédant l'équipement nécessaire pour réaliser de tels essais.

Le test de pelage consiste à peler sur une certaine longueur un échantillon de GCB mesurant 10 centimètres de large, et à mesurer la résistance offerte par les fibres de l'aiguilletage. Le test se fait à l'aide d'un appareil permettant d'agripper les deux géotextiles du GCB séparément à l'aide de deux mâchoires situées à une extrémité de l'échantillon, puis à éloigner ces deux mâchoires l'une de l'autre, à une vitesse constante de 50 mm/min et sur une distance d'au moins 300 millimètres. Le test doit être repris plusieurs fois avec différents échantillons provenant du même GCB, et la force de résistance maximale mesurée à chaque fois sert à calculer une valeur moyenne. Un échantillon de largeur inférieure à 10 centimètres peut être utilisé, cependant les résultats doivent être rapportés pour une largeur équivalente de 10 centimètres.

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS ET ANALYSE DES RÉSULTATS

#### 4.1 Généralités

L'ensemble des résultats obtenus ainsi que l'analyse de ces résultats sont présentés dans ce chapitre. Les 125 courbes de résistance au cisaillement en fonction du déplacement obtenues en laboratoire sont présentées à l'annexe I et l'ensemble des résultats obtenus lors du cisaillement direct des GCB est présenté aux tableaux A2.1, A2.2 et A2.3 de l'annexe II. Les graphiques utilisés pour déterminer les paramètres de Mohr-Coulomb sont présentés à l'annexe III. Également, divers graphiques montrant la relation entre le temps d'hydratation, la contrainte normale et la teneur en eau, ainsi que la relation entre la teneur en eau et la résistance au cisaillement selon diverses vitesses de cisaillement et contraintes normales sont présentés à l'annexe IV. Les annexes suivantes présentent d'autres tableaux et graphiques ayant servi à la présente étude.

#### 4.2 Caractéristiques des GCB utilisés

Les caractéristiques associées à chacun des six GCB utilisés sont définies dans le tableau 4.1 de la page suivante. À remarquer, les valeurs du test de pelage pour les GCB no. 4, 5 et 6 sont inférieures à celles des GCB no. 1, 2, 3, et ce malgré le fait qu'une fusion thermique ait été appliquée sur les échantillons afin de mieux ancrer les fibres de l'aiguilletage sur le géotextile tissé. Une explication possible de cette observation veut que lors de l'opération servant à fusionner les fibres au géotextile, une chaleur trop intense ait été appliquée, endommageant ainsi les fibres au-delà du

géotextile tissé et réduisant du même coup leur résistance à la traction. Ce fait n'a cependant pas pu être confirmé avec le fabricant.

**Tableau 4.1 - Caractéristiques des GCB utilisés**

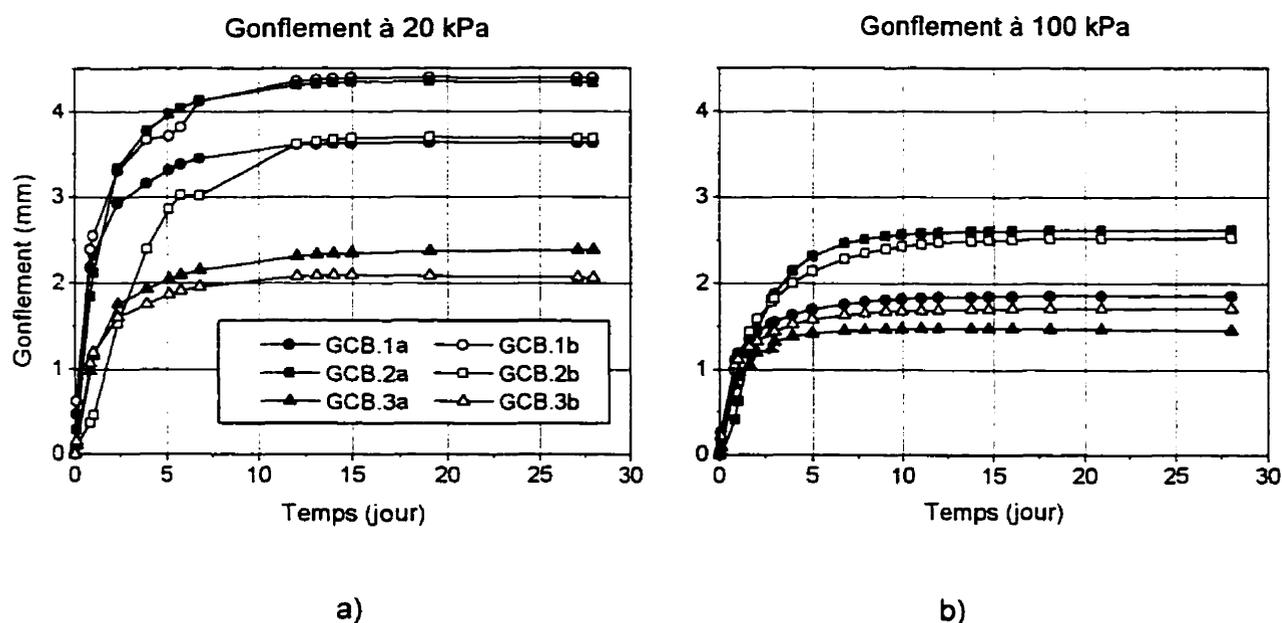
| GCB No. | Pelage (N/10cm) | Pelage (nombre d'essais) | Épaisseur (mm) | Masse Surfaccique (kg/m <sup>2</sup> ) | Particularité                 |
|---------|-----------------|--------------------------|----------------|--|-------------------------------|
| 1       | 55              | 25                       | 7,2            | 5,0                                    | Non-tissé saturé de bentonite |
| 2       | 78              | 15                       | 7,6            | 5,8                                    | Non-tissé saturé de bentonite |
| 3       | 183             | 15                       | 7,9            | 5,0                                    | Tissé renforcé (double)       |
| 4       | 40              | 10                       | 7,2            | 5,0                                    | idem 1, avec fusion thermique |
| 5       | 71              | 10                       | 7,6            | 5,8                                    | idem 2, avec fusion thermique |
| 6       | 131             | 10                       | 7,9            | 5,0                                    | idem 3, avec fusion thermique |

Les tests de pelage ont été effectués à plusieurs reprises pour chaque GCB. La variabilité des résultants obtenus est plus importante pour certains GCB que pour d'autres, tel que démontré par les coefficients de variation moyens qui sont de 15%, 15%, 10%, 54% 11% et 8% pour les GCB no. 1 à 6 respectivement. Ces résultats indiquent qu'il existe une variabilité spatiale de l'aiguilletage des GCB, plus ou moins importante selon le GCB testé.

#### **4.3 Temps d'hydratation et gonflement des GCB**

Les courbes de gonflement présentées aux figures 4.1a) et 4.1b) ont été obtenues suite à l'hydratation d'échantillons provenant des GCB 1, 2 et 3 soumis à des pressions de 20 et 100 kPa, le temps zéro correspondant au début de la submersion.

Selon la contrainte utilisée et le GCB considéré, les courbes de gonflement indiquent que entre le 10<sup>e</sup> et 14<sup>e</sup> jour le gonflement n'est plus perceptible. Une durée d'hydratation supérieure à 14 jours est considérée comme n'ayant plus d'effet significatif sur la teneur en eau de la bentonite. Une contrainte de 20 kPa fut utilisée pour effectuer une première série d'essais de gonflement, cependant celle-ci fut remplacée par la suite par une contrainte normale de 25 kPa lors des essais de résistance au cisaillement.



**Figure 4.1 - Gonflement des GCB 1, 2 et 3 lors de leur hydratation à 20 et 100 kPa.**

Des mesures de la teneur en eau, effectuées sur une autre série d'échantillons et à des durées d'hydratation différentes, ont permis de déterminer que la teneur en eau n'est pas directement reliée au gonflement de la bentonite, c'est-à-dire par exemple qu'à la moitié du gonflement maximum ne correspond pas la moitié de la teneur en eau maximale. En effet, les teneurs en eau obtenues après 48 heures de submersion sont

généralement à moins de 10% de la valeur maximale, alors que le gonflement n'est dans l'ensemble qu'à environ 50% de l'optimum.

La présence du gonflement démontre qu'il y a changement au niveau de la structure des particules d'argile, même si la teneur en eau ne change que très peu. Afin de réduire l'influence de ces variations structurales sur la résistance au cisaillement des GCB, les échantillons de GCB devant avoir une teneur en eau élevée ont été hydratés pour une longue période, soit 14 jours ou plus.

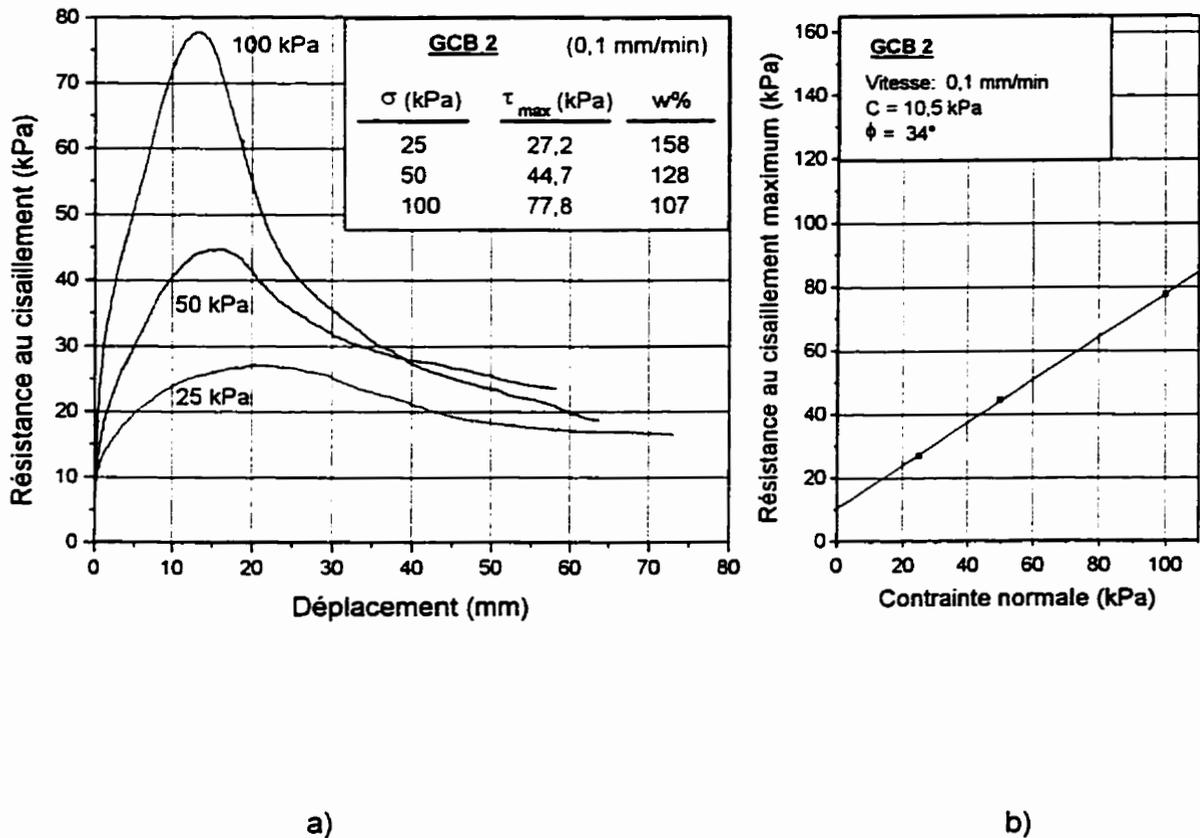
#### **4.4 Cisaillement des GCB**

##### **4.4.1 Résultats**

L'ensemble des résultats obtenus lors du cisaillement direct des GCB en laboratoire est présenté aux tableaux A2.1, A2.2 et A2.3 de l'annexe II. Pour chaque GCB testé sous une contrainte et à une vitesse données, les valeurs suivantes sont fournies: la résistance au cisaillement maximum ( $\tau_{\max}$ ), la teneur en eau à la fin du test (w%) ainsi que la durée de l'hydratation.

Au total 130 échantillons ont été cisailés en condition non-drainée, étant donné que les vitesses de cisaillement utilisées étaient relativement élevées. Cinq des 130 essais n'ont pas été considérés lors de l'analyse des résultats étant donné que des erreurs sont survenues au cours des essais de laboratoire. Les valeurs de  $\tau_{\max}$  présentées dans les tableaux A2.1, A2.2 et A2.3 ont été déterminées à partir des courbes de résistance au cisaillement en fonction de la déformation présentées à l'annexe I. Un exemple typique de ces courbes est présenté à la figure 4.2a). Les courbes présentées

correspondent au GCB no. 2 cisailé à une vitesse de 0,1 mm par minute après avoir été hydraté sous diverses contraintes pendant plus de 14 jours. À chacune des contraintes normales (25, 50 et 100 kPa) correspond une résistance au cisaillement maximum différente. La figure 4.2b) montre la relation entre la contrainte normale et la résistance au cisaillement maximum, à partir de laquelle il est possible de déterminer les paramètres de Mohr-Coulomb  $c$  (cohésion) et  $\phi$  (angle de friction interne).



**Figure 4.2 - Exemple de trois essais de résistance au cisaillement et enveloppe de Mohr-Coulomb associée.**

#### 4.4.2 État des fibres de l'aiguilletage au démontage

L'état des fibres de l'aiguilletage des échantillons de GCB a été évalué visuellement à la fin de chaque essai de cisaillement direct. La rupture des fibres était soit complète ou partielle. Cette rupture des fibres de l'aiguilletage débutait à proximité du point d'attache du géotextile supérieur (non-tissé), pour se propager par la suite vers l'autre extrémité du GCB. L'état final de l'aiguilletage, représenté en terme de pourcentage de la surface de l'échantillon où il y a eu rupture des fibres, est présenté au tableau 4.2. Cette surface a été déterminée en mesurant celle où il n'y a pas eu de rupture apparente, car avec la rupture de l'aiguilletage s'est produit un certain étirement des géotextiles. Ainsi, la longueur moyenne de chaque GCB dans le sens du déplacement, où les deux géotextiles étaient encore attachés ensemble, fut mesurée puis soustraite de la longueur initiale (305 mm) de l'échantillon.

Le fait d'avoir permis aux boîtes de cisaillement de se déplacer l'une par rapport à l'autre sur des distances différentes pour chaque essai (de 60 à 80 mm environ), peut avoir une influence sur la surface des GCB où il y a eu rupture des fibres de l'aiguilletage. Certains essais ont été faits sur des distances supérieures dans le but d'obtenir une mesure précise de la résistance résiduelle au cisaillement.

Néanmoins, une relation directe existe entre le pourcentage des fibres de l'aiguilletage qui ont été entièrement cisailées et la contrainte normale appliquée. Pour une contrainte normale de 25 kPa, seulement 10% des échantillons ont subi une rupture complète des fibres de l'aiguilletage, alors que cette proportion augmente à 50% pour une contrainte normale de 100 kPa.

**Tableau 4.2 - Rupture des fibres de l'aiguilletage en % de la surface du GCB après cisaillement.**

| Vitesse<br>(mm/min)         | Hydratation<br>(durée) | GCB | 25 kPa      | 50 kPa      | 100 kPa     |
|-----------------------------|------------------------|-----|-------------|-------------|-------------|
|                             |                        |     | rupture (%) | rupture (%) | rupture (%) |
| 1                           | Sec                    | 1   | 50          | 100         | 100         |
|                             |                        | 2   | 35          | 5           | 75          |
|                             |                        | 3   | 5           | n.d.        | 15          |
|                             | 2 H                    | 4   | 50          | 90          | 100         |
|                             |                        | 5   | 10          | 15          | 75          |
|                             |                        | 6   | 15          | 20          | 70          |
|                             | 14 H                   | 1   | 100         | 95          | 100         |
|                             |                        | 2   | 60          | 65          | 100         |
|                             |                        | 3   | 5           | 25          | 60          |
|                             |                        | 4   | 50          | 90          | 100         |
|                             |                        | 5   | 25          | 70          | 100         |
|                             |                        | 6   | 20          | 50          | 100         |
|                             | 14 H<br>submergé       | 4   | 60          | 95          | 100         |
|                             |                        | 5   | 35          | 80          | 100         |
|                             |                        | 6   | 25          | 50          | 80          |
|                             | 48 H                   | 1   | 100         | 100         | 100         |
|                             |                        | 2   | 35          | 70          | 75          |
|                             |                        | 3   | 20          | 25          | 65          |
|                             | >14 J                  | 1   | 75          | 100         | 100         |
|                             |                        | 2   | 35          | 50          | 100         |
|                             |                        | 3   | 25          | 35          | 60          |
|                             |                        | 4   | 60          | 90          | 100         |
|                             |                        | 5   | 30          | 60          | 100         |
|                             |                        | 6   | 20          | 50          | 80          |
| >14 J<br>sans<br>contrainte | 4                      | 100 | 100         | 100         |             |
|                             | 5                      | 60  | 95          | 100         |             |
|                             | 6                      | 35  | 60          | 80          |             |

Note: n.d. non disponible

Tableau 4.2 - (Suite)

| Vitesse<br>(mm/min) | Hydratation<br>(durée) | GCB | 25 kPa      | 50 kPa      | 100 kPa     |
|---------------------|------------------------|-----|-------------|-------------|-------------|
|                     |                        |     | rupture (%) | rupture (%) | rupture (%) |
| 0,1                 | 14 H                   | 1   | 100         | 100         | 100         |
|                     |                        | 2   | 50          | 75          | 95          |
|                     |                        | 3   | 20          | 50          | 70          |
|                     |                        | 4   | 70          | 85          | 100         |
|                     |                        | 5   | 50          | 60          | 80          |
|                     |                        | 6   | 40          | 40          | 85          |
|                     | >14 J                  | 1   | 70          | 100         | 100         |
|                     |                        | 2   | 60          | 75          | 100         |
|                     |                        | 3   |             |             | 75          |
|                     |                        | 4   | 75          | 100         | 100         |
|                     |                        | 5   | 40          | 65          | 99          |
|                     |                        | 6   | 30          | 50          | 80          |
| 0,01                | >14 J                  | 3   |             |             | 80          |
|                     |                        | 4   | 60          | 95          | 100         |
|                     |                        | 5   | 50          | 70          | 90          |
|                     |                        | 6   | 30          | 65          | 90          |

De plus, il y a une relation directe entre la résistance au pelage d'un GCB et la surface de l'échantillon où l'aiguilletage a été défait. La figure 4.3 donne les valeurs moyennes en % de la surface où il y a eu rupture des fibres pour chaque GCB en fonction de sa résistance au pelage et selon la contrainte normale appliquée. La relation entre la résistance au pelage et la proportion de l'aiguilletage qui fut défait est clairement définie pour les trois contraintes normales, c'est-à-dire que plus la résistance au pelage est élevée, moins les fibres de l'aiguilletage auront tendance à rompre ou à se défaire.

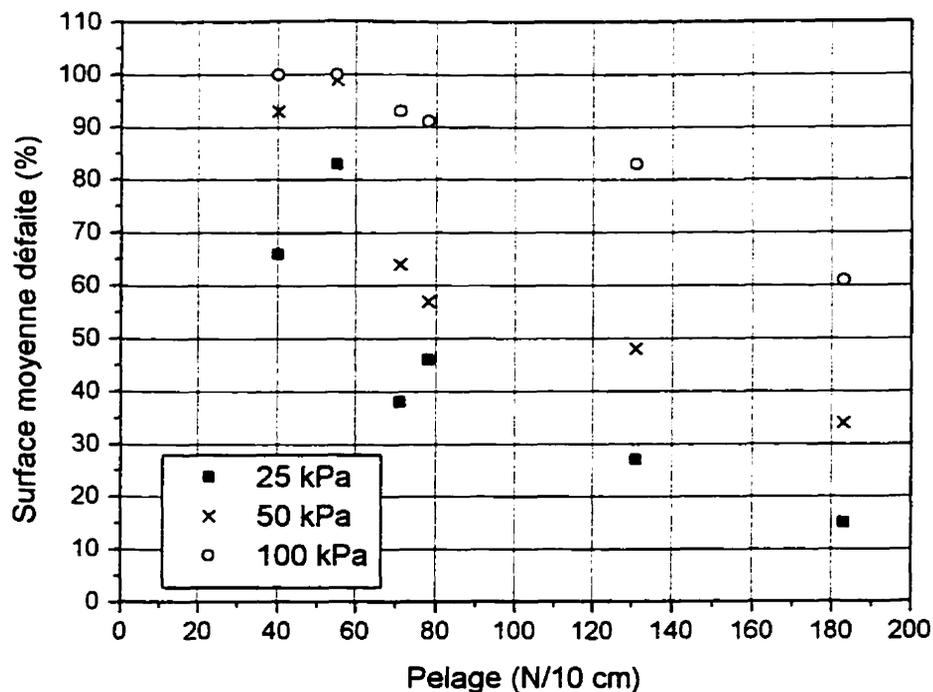
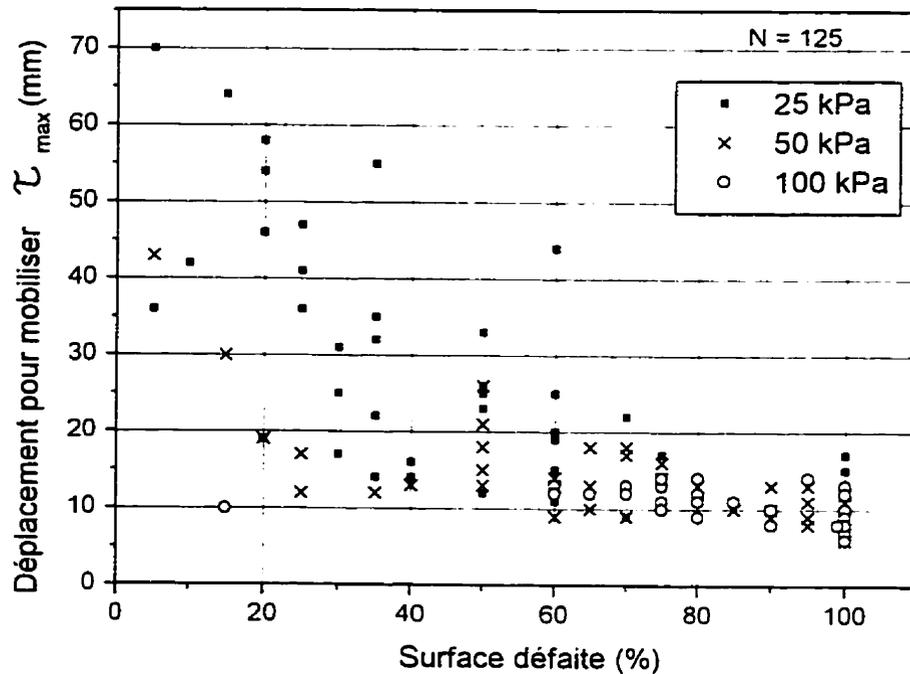


Figure 4.3 - Relation entre la valeur moyenne de la surface en % où l'aiguilletage a été défait et la résistance au pelage des GCB.

#### 4.4.3 Déplacement requis pour mobiliser $\tau_{\max}$

Le déplacement requis afin de mobiliser la résistance au cisaillement maximum ( $\tau_{\max}$ ) est directement relié à la contrainte normale appliquée lors des essais. Les déplacements les plus courts ont été obtenus avec la contrainte normale de 100 kPa et varient de 6 à 14 mm, alors que des déplacements variant de 9 à 70 mm ont été obtenus avec la contrainte de 25 kPa. Les résultats concernant les déplacements requis afin de mobiliser  $\tau_{\max}$  sont présentés au tableau A5.1 de l'annexe V.

Une relation existe entre le déplacement requis pour mobiliser  $\tau_{\max}$  et la surface où l'aiguilletage a été défait, tel que montré à la figure 4.4. De façon générale, les échantillons ayant obtenu un taux de rupture de l'aiguilletage important ont également mobilisé  $\tau_{\max}$  rapidement. De plus, les déplacements requis pour mobiliser  $\tau_{\max}$  sont généralement plus importants lorsque la contrainte normale est faible (25 kPa). Ceci pourrait être le résultat d'un léger glissement entre les GCB et les boîtes de cisaillement, alors que les forces de friction diminuent avec la réduction de la contrainte normale.



**Figure 4.4 - Relation entre le déplacement requis pour mobiliser  $\tau_{\max}$  et la surface (en %) où l'aiguilletage a été défait.**

#### 4.4.4 Résistance résiduelle au cisaillement ( $\tau_{rés}$ )

La résistance résiduelle au cisaillement ( $\tau_{rés}$ ) d'un GCB peut être déterminée à l'aide de la courbe de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement. Ainsi, lorsque la résistance au cisaillement se stabilise à grand déplacement, la valeur de  $\tau_{rés}$  peut être mesurée. L'ensemble des valeurs mesurées sont présentées au tableau 4.3. Le déplacement minimum requis pour pouvoir déterminer  $\tau_{rés}$  est d'environ 60 mm; cependant, des déplacements supérieurs à 80 mm n'étaient parfois pas suffisants pour obtenir une valeur stable de la résistance au cisaillement, ce qui explique l'absence de plusieurs valeurs dans le tableau.

Les valeurs de  $\tau_{rés}$  qui ont été mesurées alors qu'il y avait rupture complète des fibres de l'aiguilletage sont également identifiées au tableau 4.3. Ces valeurs sont faciles à déterminer sur les courbes de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement étant donné que les fibres de l'aiguilletage n'ont plus d'effet sur la résistance au cisaillement des GCB et que celle-ci s'est stabilisée.

La plupart des autres valeurs de  $\tau_{rés}$  ont été déterminées alors que la résistance au cisaillement approchait la stabilité, cependant ces valeurs sont anormalement élevées, suggérant que les fibres encore présents continuent à avoir un effet sur la résistance au cisaillement interne des GCB.

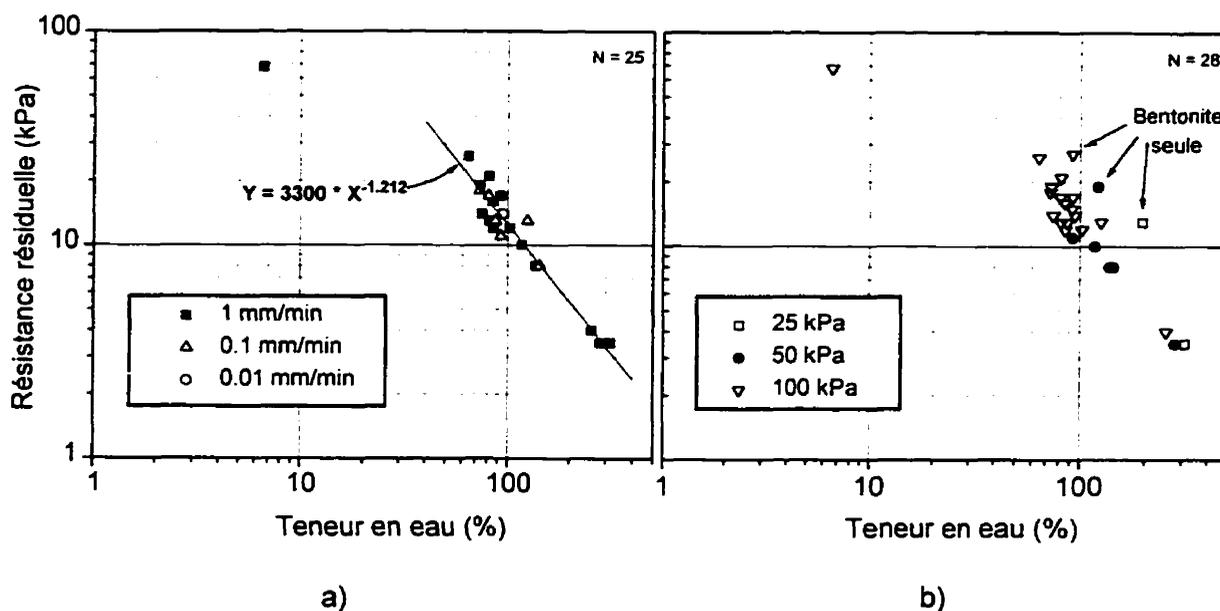
L'inspection visuelle de chaque GCB après avoir complété l'essai de cisaillement a démontré que la bentonite adhérait au géotextile supérieur non-tissé et que la surface de cisaillement était située en partie dans la bentonite et en partie sur l'interface bentonite géotextile tissé.

**Tableau 4.3 - Résistances résiduelles au cisaillement ( $\tau_{rés}$ ) lors des essais de cisaillement interne des GCB.**

| Vitesse<br>(mm/min)         | Hydratation<br>(durée) | Contrainte<br>(kPa) | GCB et Résistance résiduelle au cisaillement (kPa) |     |      |     |     |     |
|-----------------------------|------------------------|---------------------|--|-----|------|-----|-----|-----|
|                             |                        |                     | 1  | 2   | 3    | 4   | 5   | 6   |
| 1                           | Sec                    | 25                  | -  | -   | -    |     |     |     |
|                             |                        | 50                  | -  | -   | -    |     |     |     |
|                             |                        | 100                 | 68*  | -   | -    |     |     |     |
|                             | 2 H                    | 25                  |  |     |      | -   | -   | -   |
|                             |                        | 50                  |  |     |      | -   | -   | -   |
|                             |                        | 100                 |  |     |      | 19* | 42  | -   |
|                             | 14 H                   | 25                  | -  | -   | -    | -   | -   | -   |
|                             |                        | 50                  | -  | -   | -    | -   | 25  | -   |
|                             |                        | 100                 | 16*  | 26* | 40   | -   | 14* | 12* |
|                             | 14 H<br>submergé       | 25                  |  |     |      | -   | -   | -   |
|                             |                        | 50                  |  |     |      | -   | -   | -   |
|                             |                        | 100                 |  |     |      | 15* | 13* | -   |
|                             | 48 H                   | 25                  | -  | -   | -    |     |     |     |
|                             |                        | 50                  | 10*  | -   | -    |     |     |     |
|                             |                        | 100                 | 16*  | 32  | 35   |     |     |     |
| >14 J                       | 25                     | -                   | -  | -   | -    | -   | -   |     |
|                             | 50                     | 8*                  | -  | -   | -    | -   | -   |     |
|                             | 100                    | 17*                 | 21*  | 40  | 12*  | 13* | 30  |     |
| >14 J<br>sans<br>contrainte | 25                     |                     |  |     | 3,5* | -   | -   |     |
|                             | 50                     |                     |  |     | 3,5* | -   | -   |     |
|                             | 100                    |                     |  |     | 4*   | -   | -   |     |
| 0,1                         | 14 H                   | 25                  | -  | -   | -    | -   | -   | -   |
|                             |                        | 50                  | 11*  | -   | 30   | -   | 26  | -   |
|                             |                        | 100                 | 17*  | -   | 30   | 18* | 30  | -   |
|                             | >14 J                  | 25                  | 15   | -   |      | -   | -   | -   |
|                             |                        | 50                  | 8*   | -   |      | -   | -   | -   |
|                             |                        | 100                 | 13*  | -   | 27   | 13* | -   | -   |
| 0,01                        | >14 J                  | 25                  |  |     |      | 16  | 15  | -   |
|                             |                        | 50                  |  |     |      | -   | -   | -   |
|                             |                        | 100                 |  |     | 24   | 14* | -   | -   |

**Note:** \* rupture complète (100%) des fibres de l'aiguillage

La figure 4.5 présente l'influence que la teneur en eau peut avoir sur  $\tau_{rés}$  tout en tenant compte de la vitesse de cisaillement ou de la contrainte normale appliquée. Seules les valeurs de  $\tau_{rés}$  correspondant à des GCB dont l'aiguillette a été complètement défait ont été considérées, car du moment où les fibres n'influencent plus la résistance au cisaillement, il est possible de combiner les résultats provenant de tous les GCB.



**Figure 4.5 - Influence de la teneur en eau sur  $\tau_{rés}$  tout en tenant compte de la vitesse de cisaillement et de la contrainte normale appliquée.**

La figure 4.5a) démontre que pour l'ensemble des valeurs de  $\tau_{rés}$  considérées les vitesses de cisaillement n'ont pas d'effet significatif, celles-ci correspondant toutes à des vitesses non-drainées. Cependant, une augmentation de la teneur en eau dans la bentonite fait diminuer la résistance résiduelle au cisaillement. Cette relation est représentée par la fonction qui se trouve à la figure 4.5a) et pour laquelle le coefficient de corrélation est égal à 0,96.

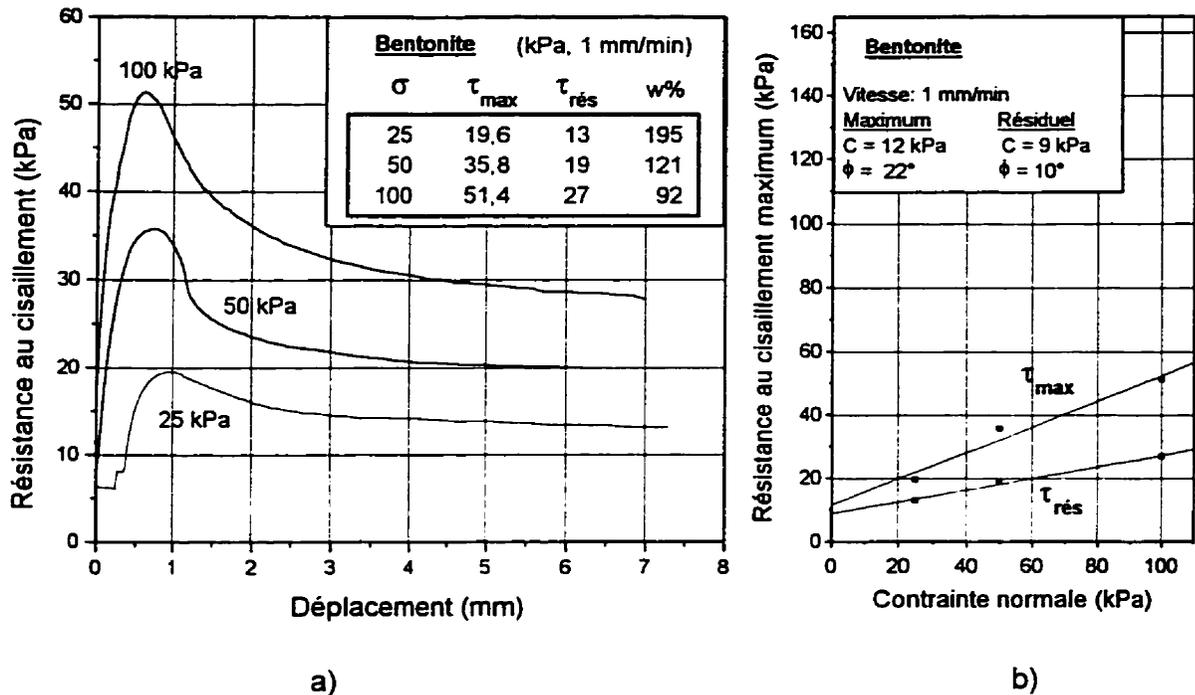
La valeur la plus élevée de  $\tau_{rés}$ , obtenue avec un échantillon sec, n'est pas tout à fait en ligne avec les autres résultats présentés sur le graphique à échelles logarithmiques. Lorsque la teneur en eau est faible, les particules d'argile sont en contact direct les unes contre les autres et l'effet de ces contacts diminue à mesure que l'argile adsorbe des quantités d'eau de plus en plus importantes, modifiant du même coup les forces de friction qui agissent entre les particules d'argile. La teneur en eau correspondant à la transition entre les deux types d'interactions des particules d'argile (humide ou sec) n'a pas été déterminée. Cependant, celle-ci devrait se situer approximativement entre 10 et 60%, ce qui correspond à la plage des teneurs en eau non couverte sur le graphique de la figure 4.5a).

En éliminant les données ayant une teneur en eau très élevée et celles obtenues avec la bentonite seule, la figure 4.5b) démontre qu'il existe une relation entre la contrainte normale et  $\tau_{rés}$ . Cependant cette relation est due au fait que la teneur en eau est directement reliée à la contrainte appliquée lors de l'hydratation des GCB.

Les résultats de  $\tau_{rés}$  obtenus lors du cisaillement de la bentonite seule sont également présentés à la figure 4.5b). L'analyse de ces résultats est présentée à la section suivante.

#### **4.5 Cisaillement de la bentonite seule**

Les courbes de résistance au cisaillement obtenues pour la bentonite seule, cisailée à 1 mm par minute et en condition submergée, sont présentées à la figure 4.6a). La figure 4.6b) est utilisée pour déterminer les paramètres de Mohr-Coulomb. Ainsi, l'angle de friction interne maximum de la bentonite est de  $22^\circ$ , alors que l'angle résiduel est de  $10^\circ$ .



**Figure 4.6 - Essais de résistance au cisaillement et enveloppe de Mohr-Coulomb associée pour la bentonite seule (Volclay SPV 200).**

Chaque essai a été effectué après que le gonflement de la bentonite ne soit plus perceptible. Les courbes de gonflement en fonction du temps sont présentées à l'annexe VI.

Les résultats de  $\tau_{\text{rés}}$  obtenus lors du cisaillement de la bentonite seule et qui sont présentés à la figure 4.5b) démontrent que pour une même teneur en eau, la résistance résiduelle au cisaillement de la bentonite seule est légèrement supérieure à celle obtenue par l'ensemble des GCB. Cette différence peut venir du fait que l'angle de friction entre la bentonite et le géotextile tissé soit plus faible que l'angle de friction interne de la bentonite seule. Aucun essai n'a été réalisé pour vérifier cette hypothèse.

#### 4.6 Influence de la vitesse de cisaillement

L'analyse sommaire des résultats obtenus et présentés aux tableaux A2.1 à A2.3 indique que, de façon générale et pour des conditions semblables, l'augmentation de la vitesse de cisaillement fait également augmenter la résistance au cisaillement maximum. Afin de mieux évaluer cette tendance, le tableau 4.4 présente les résultats obtenus avec les GCB hydratés pendant 14 jours et plus. Ces échantillons ont été choisis car cette durée d'hydratation est la seule qui est commune aux trois vitesses de cisaillement utilisées. Une similitude au niveau de la teneur en eau, provenant du conditionnement semblable de chaque échantillon de GCB, réduit également l'influence possible de ce paramètre sur les résultats présentés.

Le tableau 4.4 présente des résultats uniques pour chaque combinaison de variables (GCB, contrainte normale et vitesse), c'est-à-dire que chaque couple de valeurs de  $\tau_{\max}$  et  $w\%$  correspond à un seul essai. De plus, l'influence de la vitesse sur la résistance au cisaillement montrée au tableau 4.4, est exprimée en pourcentage d'augmentation (ou de diminution dans certains cas) entre deux valeurs de résistances au cisaillement, pour une augmentation de la vitesse par un facteur de 10 (de 0,01 à 0,1 et de 0,1 à 1 mm par minute) représenté par  $\tau_{10}$ , ainsi que pour un facteur de 100 (de 0,01 à 1 mm par minute) représenté par  $\tau_{100}$ . La teneur en eau associée à chaque test est également fournie pour fins de comparaisons.

**Tableau 4.4 - Influence de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement maximum, pour des GCB hydratés pendant 14 jours ou plus (44 essais).**

| GCB No. | Vitesse (mm/min)   | 0,01 |      |       | 0,1  |      |      | 1    |      |       |
|---------|--------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|
|         |                    | 25   | 50   | 100   | 25   | 50   | 100  | 25   | 50   | 100   |
| 1       | $\tau_{max}$ (kPa) |      |      |       | 20,5 | 34,2 | 47,8 | 33,9 | 43,5 | 70,3  |
|         | W% (%)             |      |      |       | 154  | 143  | 125  | 139  | 137  | 93    |
|         | $\tau_{10}$        |      |      |       |      |      |      | +65% | +27% | +47%  |
|         |                    |      |      |       |      |      |      |      |      |       |
| 2       | $\tau_{max}$ (kPa) |      |      |       | 27,2 | 44,7 | 77,8 | 33,2 | 47,4 | 86,0  |
|         | W% (%)             |      |      |       | 158  | 128  | 107  | 148  | 106  | 82    |
|         | $\tau_{10}$        |      |      |       |      |      |      | +22% | +6%  | +11%  |
|         |                    |      |      |       |      |      |      |      |      |       |
| 3       | $\tau_{max}$ (kPa) |      |      | 101,9 |      |      | 83,0 | 39,7 | 62,4 | 115,0 |
|         | W% (%)             |      |      | 108   |      |      | 125  | 142  | 121  | 95    |
|         | $\tau_{10}$        |      |      |       |      |      | -19% |      |      | +39%  |
|         | $\tau_{100}$       |      |      |       |      |      |      |      |      | +13%  |
| 4       | $\tau_{max}$ (kPa) | 20,2 | 32,6 | 57,3  | 24,4 | 37,9 | 60,4 | 31,6 | 45,8 | 72,1  |
|         | W% (%)             | 136  | 113  | 94    | 133  | 123  | 87   | 130  | 109  | 85    |
|         | $\tau_{10}$        |      |      |       | +21% | +16% | +5%  | +30% | +21% | +19%  |
|         | $\tau_{100}$       |      |      |       |      |      |      | +56% | +40% | +26%  |
| 5       | $\tau_{max}$ (kPa) | 26,3 | 41,2 | 66,8  | 27,2 | 44,6 | 88,8 | 32,2 | 56,0 | 94,9  |
|         | W% (%)             | 109  | 95   | 83    | 107  | 99   | 79   | 104  | 95   | 82    |
|         | $\tau_{10}$        |      |      |       | +3%  | +8%  | +33% | +18% | +26% | +7%   |
|         | $\tau_{100}$       |      |      |       |      |      |      | +22% | +36% | +42%  |
| 6       | $\tau_{max}$ (kPa) | 27,6 | 54,7 | 82,4  | 29,5 | 51,8 | 78,8 | 38,6 | 55,1 | 118,4 |
|         | W% (%)             | 155  | 130  | 110   | 147  | 122  | 117  | 123  | 122  | 101   |
|         | $\tau_{10}$        |      |      |       | +7%  | -5%  | -4%  | +31% | +6%  | +50%  |
|         | $\tau_{100}$       |      |      |       |      |      |      | +40% | +1%  | +44%  |
| Moy 1   | $\tau_{10}$        |      |      |       | +10% | +6%  | +4%  | +33% | +17% | +29%  |
|         | $\tau_{100}$       |      |      |       |      |      |      | +39% | +26% | +31%  |
| Moy 2   | $\tau_{10}$        |      |      |       | +7%  |      |      | +26% |      |       |
|         | $\tau_{100}$       |      |      |       |      |      |      | +32% |      |       |

La tendance générale perçue lors des essais est confirmée par les valeurs moyennes obtenues. Ainsi par exemple, une augmentation de la vitesse de cisaillement allant de 0,1 à 1 mm par minute a donné une augmentation moyenne de la résistance au cisaillement de 26%, de même qu'une augmentation de la vitesse allant de 0,01 à 1 mm par minute a donné une augmentation moyenne de la résistance de 32%. Cependant, ces moyennes ne représentent pas les résultats individuels, étant donné que des variations allant de -19% à +65% furent observées, indépendamment du rapport de vitesse considéré.

La norme ASTM D 5321-92 utilisée pour effectuer l'essai de cisaillement direct impliquant au-moins un géosynthétique, exige qu'une vitesse de cisaillement de 1 mm par minute soit utilisée. Considérant alors cette vitesse comme vitesse de référence, en réduisant la vitesse de cisaillement de 1 à 0,1 mm par minute, résultera une baisse moyenne de la résistance au cisaillement maximum de 21%, et cette même baisse moyenne sera de 24% pour une réduction de la vitesse de cisaillement allant de 1 à 0,01 mm par minute.

L'ensemble des résultats obtenus fut également considéré afin de déterminer l'influence de la vitesse de cisaillement sur  $\tau_{\max}$ . Cependant, l'utilisation de tous les essais disponibles fait en sorte que l'influence de la teneur en eau sur  $\tau_{\max}$  est plus importante, étant donné la grande variabilité des mesures, et que son effet va s'ajouter à celui de la vitesse. De plus, les essais effectués avec les échantillons secs et hydratés sans contrainte ne sont pas inclus, étant donné que ces conditions extrêmes peuvent avoir une influence démesurée sur les valeurs de  $\tau_{\max}$  obtenues.

En considérant l'ensemble des résultats obtenus, une augmentation de la vitesse de cisaillement allant de 0,1 à 1 mm par minute a donné une augmentation moyenne de la résistance au cisaillement de 19%, de même qu'une augmentation de la vitesse allant de 0,01 à 1 mm par minute a donné une augmentation moyenne de la résistance de 41%. Considérant maintenant une vitesse de cisaillement de 1 mm/min comme étant la vitesse de référence, une réduction de la vitesse de 1 à 0,1 mm par minute résultera en une baisse moyenne de la résistance au cisaillement maximum de 16%, et cette même baisse moyenne sera de 30% pour une réduction de la vitesse de cisaillement allant de 1 à 0,01 mm par minute. Cette dernière valeur est légèrement supérieure au 24% obtenu précédemment avec le sous-groupe représenté par les GCB hydratés pendant 14 jours et plus.

Un tableau semblable au tableau 4.4, donnant l'influence moyenne de la vitesse sur  $\tau_{\max}$  pour l'ensemble des résultats obtenus, est présenté à l'annexe VII.

#### **4.7 Influence de la teneur en eau sur $\tau_{\max}$**

Afin de déterminer l'influence que la teneur en eau peut avoir sur la résistance au cisaillement maximum, cette influence est déterminée en considérant la variation de  $\tau_{\max}$  en pourcentage résultant d'une variation absolue de la teneur en eau. L'utilisation de la variation relative de  $\tau_{\max}$  plutôt qu'une différence absolue permet de comparer les résultats obtenus indépendamment de la contrainte normale appliquée. Ainsi, les données obtenues pour chaque GCB et appartenant à un groupe de contrainte et de vitesse spécifiques ont été comparées entre elles. Les données ayant été obtenues avec différentes vitesses ne doivent pas être comparées directement, étant donné qu'à teneur en eau égale, une vitesse plus faible résultera en une valeur de  $\tau_{\max}$  plus faible.

Par exemple, les données obtenues avec le GCB 1, à 25 kPa et 1 mm/min furent comparées les unes aux autres, ensuite les données obtenues avec le GCB 1, à 25 kPa et 0,1 mm/min cette fois-ci furent comparées les unes aux autres, et ainsi de suite. Ces comparaisons sont possibles en autant qu'il y ait au moins deux essais de cisaillement par groupe. Les résultats obtenus à 0,01 mm/min n'ont pas été utilisés car il n'y a eu qu'un seul essai par contrainte normale et par GCB. De plus, les essais faits avec les échantillons sec et les échantillons hydratés sans contrainte normale n'ont pas été utilisés, étant donné l'influence démesurée que ces quelques résultats peut avoir sur l'ensemble.

L'analyse statistique des variations de  $\tau_{\max}$  en fonction des variations de la teneur en eau, groupées par GCB, a permis de calculer des coefficients de corrélation ( $r$ ) variant entre -0,90 pour le GCB 1 et 0,47 pour le GCB 6, indiquant que l'effet de la teneur en eau sur  $\tau_{\max}$  est très variable. Les résultats finaux obtenus pour chaque GCB, soit le coefficient de corrélation ( $r$ ) et la variation de  $\tau_{\max}$  correspondant à une différence absolue de 10% de la teneur en eau, sont présentés au tableau 4.5.

**Tableau 4.5 - Relation entre la variation absolue de la teneur en eau et la variation relative de la résistance au cisaillement maximum pour chaque GCB.**

| GCB     | $r$   | Variation de $\tau_{\max}$ pour une augmentation de $w\%$ de 10% |
|---------|-------|--|
| 1       | -0,90 | -3,7%  |
| 2       | -0,88 | -9,8%  |
| 3       | -0,62 | -1,3%  |
| 4       | -0,20 | -2,0%  |
| 5       | -0,44 | -4,4%  |
| 6       | 0,47  | +5,4%  |
| Moyenne | -0,43 | -3,4%  |

#### 4.8 Angle de friction interne

Les angles de friction interne présentés au tableau 4.6 sont directement reliés aux valeurs de résistance au cisaillement maximum obtenues. Chaque angle a été déterminé sur un graphique de la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale, à l'aide d'une droite devant passer par ou à proximité des trois points associés à un GCB, pour une durée d'hydratation et une vitesse de cisaillement données. Les graphiques utilisés pour déterminer les angles de friction interne sont présentés à l'annexe III.

**Tableau 4.6 - Angles de friction interne déterminés à partir des résistances au cisaillement maximum.**

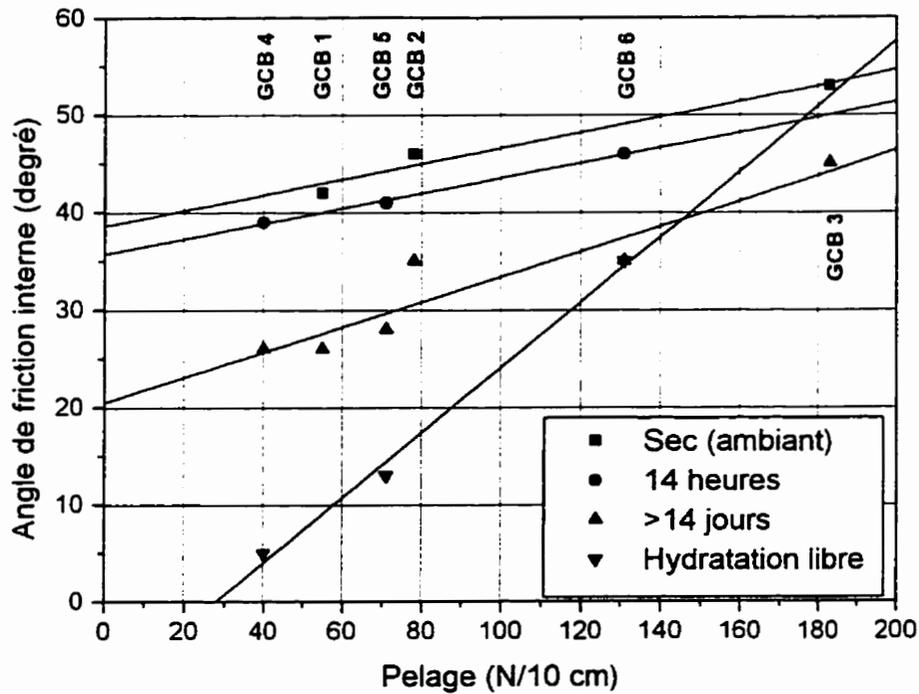
| Vitesse<br>(mm/min) | Hydratation<br>(durée)   | GCB 1<br>Pelage: 55 | GCB 2<br>78 | GCB 3<br>183 | GCB 4<br>40 | GCB 5<br>71 | GCB 6<br>131 |
|---------------------|--------------------------|---------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| 1                   | Sec                      | 42°                 | 46°         | 53°          |             |             |              |
|                     | 2 H                      |                     |             |              | 38°         | 42°         | 42°          |
|                     | 14 H                     | 26°                 | 41°         | 39°          | 29°         | 43°         | 46°          |
|                     | 14 H<br>Submergé         |                     |             |              | 39°         | 41°         | 46°          |
|                     | 48 H                     | 23°                 | 34°         | 45°          |             |             |              |
|                     | >14 J                    | 26°                 | 35°         | 45°          | 28°         | 40°         | 48°          |
|                     | >14 J<br>Sans contrainte |                     |             |              | 5°          | 13°         | 35°          |
| 0,1                 | 14 H                     | 26°                 | 37°         | 45°          | 26°         | 29°         | 37°          |
|                     | >14 J                    | 19°                 | 34°         | -            | 26°         | 40°         | 33°          |
| 0,01                | >14 J                    |                     |             |              | 26°         | 28°         | 35°          |

De façon générale, l'angle de friction est relié à la résistance au pelage des GCB, c'est-à-dire qu'à une valeur de résistance au pelage supérieure correspondra un angle de friction supérieur. Cependant, une variation de quelques kPa sur les valeurs de  $\tau_{max}$  obtenues, principalement à 25 et 100 kPa, affectera immédiatement et de façon visible l'angle de friction interne mesuré. Ainsi, certains écarts importants des valeurs d'angle de friction pour un GCB donné peut provenir du fait qu'il existe un écart relativement important entre la valeur de  $\tau_{max}$  mesurée et une valeur moyenne qui est inconnue. Cependant, pour déterminer la valeur moyenne il faudrait effectuer plusieurs essais avec des conditions identiques, ce qui n'était pas possible dans le cadre de cette étude.

Aucune valeur d'angle résiduel n'a pu être déterminée étant donné l'absence de certaines valeurs de  $\tau_{rés}$ , sauf pour le GCB no. 4 hydraté sans contrainte normale, dont les teneurs en eau des échantillons testés sont très élevées, qui a donné un angle de friction interne résiduel de 0°. Cependant, certaines paires de valeurs montrées au tableau 4.3 et associées au GCB no. 1 ont permis de trouver des angles variant entre 7 et 10 degrés, ce qui correspond assez bien à la valeur de  $\tau_{rés}$  de 10 degrés obtenue lors du cisaillement de la bentonite seule.

#### **4.9 Relation entre le test de pelage et l'angle de friction**

La relation entre le test de pelage et l'angle de friction est présenté à la figure 4.7. Cette figure démontre que pour une valeur de pelage donnée, l'angle de friction obtenu va varier selon la teneur en eau de la bentonite, celle-ci étant directement reliée avec la durée de l'hydratation des échantillons. Ainsi, il n'est pas possible de déterminer une valeur d'angle de friction interne pour un GCB donné en se basant uniquement sur le résultat obtenu par le test de pelage.



**Figure 4.7 - Relation entre le test de pelage et l'angle de friction interne des GCB.**

Les résultats obtenus par les échantillons hydratés sans contrainte normale diffèrent des autres résultats et donnent des angles de friction interne pour les GCB no. 4, 5, et 6 inférieurs à ceux obtenus pour les autres échantillons. Ces résultats seront interprétés à la section 4.11, traitant de l'influence de l'hydratation libre.

Également, la figure 4.7 démontre que pour un GCB hydraté pendant 14 jours ou plus et ayant une résistance au pelage de zéro (0) N/10cm (par exemple lorsqu'il y a rupture complète des fibres de l'aiguilletage), correspond un angle de friction interne de 21°, ce qui est presque identique à l'angle de 22° obtenu avec la bentonite seule ayant été hydratée de la même façon.

#### **4.10 Influence de la submersion**

Les résultats obtenus lors des essais submergés sont semblables à ceux obtenus sans submersion, tel que démontré aux tableaux A2.2 et A2.3 de l'annexe II. Les échantillons non-submergés devraient en principe avoir une résistance au cisaillement supérieure aux échantillons submergés. étant donné qu'en l'absence de submersion, suite à l'enlèvement des échantillons du bassin d'hydratation, les pressions interstitielles diminuent sur la surface de la bentonite.

On n'a pas observé d'influence quantifiable de la submersion. On peut attribuer cette absence à plusieurs causes: soit que les pressions interstitielles ne varient pas suffisamment, ou qu'elles n'aient pas eu le temps de varier suffisamment pour avoir un effet mesurable; ou bien encore plus probable, la variabilité des résultats provenant par exemple des variations de l'aiguilletage des échantillons, tel qu'observés lors des tests de pelage, masquent les effets de l'absence ou de la présence de la submersion.

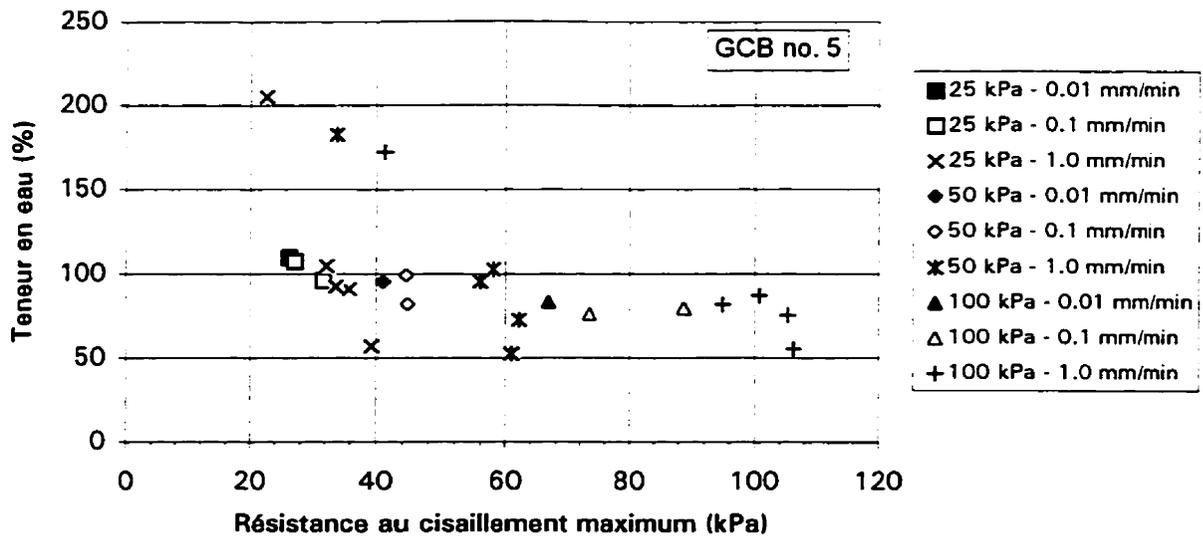
#### **4.11 Influence de l'hydratation libre (sans contrainte)**

Tel que présenté aux tableaux A2.2 et A2.3, neuf échantillons furent hydratés pendant au moins 14 jours sans être soumis à une contrainte normale. La bentonite comprise à l'intérieur des échantillons était donc libre de gonfler, limitée seulement par l'espace disponible entre les deux géotextiles des échantillons. Les résistances au cisaillement mesurées avec ces échantillons étaient de façon générale inférieures à celles mesurées avec les échantillons hydratés en étant soumis à une contrainte normale. Deux facteurs différents peuvent expliquer pourquoi la résistance interne d'un GCB est inférieure lorsque celui-ci est hydraté sans être chargé.

Il fut observé que la teneur en eau de la bentonite provenant d'un échantillon non chargé lors de l'hydratation, mesurée après le cisaillement, était de 2 à 3 fois supérieure à la teneur en eau de la bentonite hydratée avec l'application d'une contrainte normale. L'augmentation de la teneur en eau va générer des pressions interstitielles positives lorsque la contrainte normale est appliquée pour le test de cisaillement, réduisant ainsi les interactions entre les particules d'argile.

De façon plus significative cependant, la pression générée par la bentonite à l'intérieur du GCB, lors de l'hydratation sans contrainte, peut être suffisamment élevée pour endommager les liens créés par l'aiguilletage retenant les deux géotextiles ensemble. Il fut déterminé par Shan (1990) que la pression devant être appliquée sur un échantillon de bentonite de sodium submergé dans de l'eau du robinet, afin d'obtenir un déplacement vertical nul, était d'environ 135 kPa. La pression appliquée par la bentonite à l'intérieur du GCB devrait être inférieure à cette valeur, étant donné qu'il est permis à celle-ci d'avoir une certaine augmentation de volume lors de l'hydratation libre. Cependant, la pression existante peut être suffisante pour endommager le GCB de façon irréversible.

La figure 4.8 qui suit, mettant la teneur en eau en relation avec la résistance au cisaillement maximum, selon la contrainte normale appliquée et la vitesse de cisaillement utilisée, met le phénomène décrit précédemment en évidence pour le GCB no. 5. Des figures semblables se rapportant aux autres GCB se trouvent à l'annexe IV.



**Figure 4.8 - Relation entre la teneur en eau et la résistance au cisaillement maximum, selon la contrainte normale et la vitesse, pour le GCB no. 5.**

Trois points ont des teneurs en eau relativement élevées, et pour deux d'entre eux, soit pour les contraintes normales de 50 et 100 kPa, la résistance au cisaillement est clairement trop faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que lors de l'hydratation libre des GCB, ceux-ci ont été endommagés par les pressions développées par le gonflement de la bentonite, réduisant ainsi la résistance au cisaillement offerte par les fibres de l'aiguilletage.

Cette rupture des fibres de l'aiguilletage est visible surtout pour les GCB 4 et 5 qui ont donné des valeurs d'angle de friction interne de 5 et 13 degrés respectivement. Ces valeurs, reportées à la figure 4.7, font en sorte que la droite obtenue avec les GCB hydratés sans contrainte normale ne suit pas la tendance générale montrée par les autres droites.

#### 4.12 Cohésion

Le tableau 4.7 qui suit présente les valeurs de cohésion correspondant au paramètre  $c$  de l'équation de Mohr-Coulomb. Ces valeurs ont été déterminées par régression linéaire en faisant passer une droite par les trois points correspondant à la résistance au cisaillement maximum en fonction de la contrainte normale pour chaque condition d'essai. La cohésion correspond à la valeur de la résistance au cisaillement d'un GCB alors qu'aucune contrainte normale n'est appliquée. Cette valeur ne peut être nulle étant donné la présence des fibres de l'aiguilletage qui offrent une résistance au cisaillement, même en l'absence de bentonite.

La valeur de cohésion moyenne des GCB est d'environ 15 kPa, sauf pour le GCB no. 1 qui se démarque avec une valeur moyenne de 23 kPa. Le spectre des résultats obtenus est assez large, allant de 5,5 à 29,5 kPa, et aucune tendance n'a pu être définie, autre que dans la majorité des cas la cohésion est supérieure à celle obtenue avec la bentonite seule.

Tableau 4.7 - Cohésion des GCB.

| Vitesse<br>(mm/min) | Hydratation<br>(durée)      | GCB  |      |      |      |      |      | Bentonite   |
|---------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|---|
|                     |                             | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |   |
| 1                   | Sec                         | 25,0 | 19,5 | 25,5 |      |      |      | >14 J<br><u>Maximum</u><br>12<br><u>Résiduel</u><br>9 |
|                     | 2 H                         |      |      |      | 11,0 | 10,5 | 17,0 |   |
|                     | 14 H                        | 25,0 | 14,5 | 24,0 | 23,0 | 14,5 | 12,5 |   |
|                     | 14 H<br>submergé            |      |      |      | 14,0 | 12,5 | 12,5 |   |
|                     | 48 H                        | 29,5 | 17,0 | 12,0 |      |      |      |   |
|                     | >14 J                       | 20,5 | 14,0 | 14,0 | 19,0 | 13,0 | 7,0  |   |
|                     | >14 J<br>sans<br>contrainte |      |      |      | 11,5 | 19,0 | 17,0 |   |
| 0,1                 | 14 H                        | 24,5 | 14,5 | 6,5  | 17,5 | 18,0 | 16,0 |   |
|                     | >14 J                       | 14,0 | 10,5 |      | 13,0 | 5,5  | 16,0 |   |
| 0,01                | >14 J                       |      |      |      | 8,0  | 13,5 | 14,0 |   |
| Moyenne             |                             | 23,1 | 15,0 | 16,4 | 14,6 | 13,3 | 14,0 |   |
| Écart-Type          |                             | 5,3  | 3,0  | 8,1  | 4,9  | 4,2  | 3,4  |   |

#### 4.13 Amélioration produite par l'aiguilletage

Pour quantifier l'amélioration produite par l'aiguilletage sur la résistance au cisaillement interne des GCB, il faut prendre les résultats obtenus lors du cisaillement des divers GCB et comparer ceux-ci avec les résultats obtenus lors du cisaillement de la bentonite

seule. Cependant, il faut comparer des résultats obtenus dans des conditions d'essai semblables, c'est-à-dire qu'il faut tenir compte de la contrainte normale appliquée, de la vitesse de cisaillement et de la teneur en eau de la bentonite.

La bentonite seule a été cisailée à une vitesse de 1 mm/min et les teneurs en eau ( $w\%$ ) correspondant aux contraintes normales de 25, 50 et 100 kPa sont respectivement de 195, 121 et 92%. Le tableau 4.8 montre les valeurs de  $w\%$  et  $\tau_{\max}$  de la bentonite seule, ainsi que celles de certains GCB cisailés à 1 mm/min, dont la teneur en eau se situe à plus ou moins 5% en valeur absolue de la teneur en eau de la bentonite afin de limiter l'influence que ce paramètre peut avoir sur  $\tau_{\max}$ . Aucun GCB n'a pu être comparé avec la bentonite seule pour une contrainte de 25 kPa, la teneur en eau de la bentonite seule hydratée sous cette contrainte étant trop élevée.

L'amélioration relative moyenne observée est de 69% à 50 kPa et de 89% avec une contrainte de 100 kPa. Cette amélioration semble être plus importante pour les GCB ayant une résistance au pelage élevée, c'est-à-dire pour les GCB 3, 5 et 6.

Les paramètres de Mohr-Coulomb pour la bentonite seule ainsi que pour les six GCB cisailés à 1 mm/min et hydratés pendant plus de 14 jours sont présentés au tableau 4.9. Les GCB ont tous des valeurs d'angle de friction interne supérieures à  $22^\circ$ , correspondant à l'angle de la bentonite, et de façon générale les GCB ayant une résistance au pelage plus élevée ont également un angle de friction interne plus élevé. L'amélioration relative produite par les fibres va de 18% pour le GCB 1 jusqu'à 118% pour le GCB 6, qui ainsi fait plus que doubler la valeur d'angle de friction interne de la bentonite. De plus, la cohésion des GCB est généralement supérieure à celle de la bentonite.

**Tableau 4.8 - Relation entre la bentonite seule et certains GCB cisailés à 1 mm/min, afin de quantifier l'amélioration produite par l'aiguilletage sur  $\tau_{max}$ .**

| GCB       | Contrainte (kPa) | w%  | $\tau_{max}$ (kPa) | Amélioration  |              |
|-----------|------------------|-----|--------------------|---------------|--------------|
|           |                  |     |                    | Absolue (kPa) | Relative (%) |
| BENTONITE | 50               | 121 | 35,8               | -             | -            |
| 1         | 50               | 117 | 56,5               | 20,7          | 58           |
| 3         | 50               | 120 | 66,6               | 30,8          | 86           |
| 3         | 50               | 121 | 62,4               | 26,6          | 74           |
| 6         | 50               | 117 | 61,9               | 26,1          | 73           |
| 6         | 50               | 122 | 55,1               | 19,3          | 54           |
| Moyennes  |                  |     |                    | 24,7          | 69           |
| BENTONITE | 100              | 92  | 51,4               | -             | -            |
| 1         | 100              | 93  | 70,3               | 18,9          | 37           |
| 3         | 100              | 96  | 105,1              | 53,7          | 104          |
| 3         | 100              | 95  | 115,0              | 63,6          | 124          |
| 4         | 100              | 92  | 92,3               | 40,9          | 80           |
| 5         | 100              | 87  | 100,7              | 49,3          | 96           |
| 6         | 100              | 93  | 99,9               | 48,5          | 94           |
| Moyennes  |                  |     |                    | 45,8          | 89           |

**Tableau 4.9 - Paramètres de Mohr-Coulomb pour les GCB no. 1 à 6 et pour la bentonite seule, correspondant à une vitesse de cisaillement de 1 mm/min et une durée d'hydratation supérieure à 14 jours.**

| GCB      | 1    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | Bentonite |
|----------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| Angle    | 26°  | 35° | 45° | 28° | 40° | 48° | 22°       |
| Cohésion | 20,5 | 14  | 14  | 19  | 13  | 7   | 12 kPa    |

## CHAPITRE V

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Afin d'évaluer l'influence de divers paramètres sur la résistance interne des géocomposites aiguilletés, plusieurs essais de cisaillement ont été réalisés en faisant varier les paramètres suivants: la contrainte normale appliquée, la vitesse de cisaillement, la teneur en eau de la bentonite et la résistance de l'aiguilletage, en terme de résistance au pelage.

De plus, des essais effectués avec de la bentonite seule ont permis d'évaluer l'amélioration apportée par les fibres de l'aiguilletage.

#### *1) Influence de l'aiguilletage*

Selon le GCB testé, on a noté une amélioration nette de la résistance au cisaillement interne due à l'aiguilletage, par rapport à la bentonite seule, se situant entre 37 et 124%. De plus, cette amélioration de la résistance au cisaillement maximum a permis à l'occasion de doubler l'angle de friction interne obtenu avec la bentonite seule, c'est-à-dire que des valeurs de plus de 40° furent obtenues avec certains GCB, alors qu'un angle de 22° a été obtenu pour la bentonite seule.

#### *2) Influence de la vitesse de cisaillement*

On a observé qu'un changement de la vitesse de cisaillement ou une variation de la teneur en eau de la bentonite affecte à différents degrés la résistance au cisaillement interne d'un GCB.

La norme ASTM D5321-92 portant sur l'angle de friction entre un sol et un géosynthétique ou entre deux géosynthétiques requiert une vitesse de cisaillement de 1 mm par minute; cependant, une telle vitesse donne des résistances au cisaillement maximum significativement supérieures à celles obtenues avec une vitesse de 0,01 mm par minute. Une vitesse de cisaillement plus lente se rapproche des conditions à long terme et donne également des angles de friction interne plus faibles. L'utilisation d'une vitesse de cisaillement inférieure à celle recommandée par l'ASTM permettrait d'obtenir des valeurs d'angle plus conservatrices, donc plus sécuritaires lors d'applications à grande échelle de GCB aiguilletés.

Il n'y a pas encore de méthode d'essai de cisaillement interne reconnue et adaptée aux caractéristiques spécifiques des GCB. Néanmoins, la vitesse de cisaillement de 1 mm par minute est très pratique car elle peut être facilement utilisée par la plupart des laboratoires et elle permet de compléter un essai de cisaillement interne dans un délai raisonnable, c'est-à-dire environ une heure, alors qu'il faut plus de trois jours pour compléter un essai fait à 0,01 mm par minute.

Ainsi, on pourrait recommander d'utiliser une vitesse de cisaillement de 1 mm par minute, jumelée avec un facteur multiplicatif préliminaire de 0,7 afin de réduire la résistance au cisaillement maximum de 30%, ce qui correspond à la différence moyenne globale observée entre les vitesses de cisaillement de 1 et 0,01 mm par minute. Ce facteur de 0,7 devrait être révisé lorsqu'une plus grande quantité d'essais de cisaillement auront été faits, surtout avec des vitesses de cisaillement plus faibles ou suite à l'étude d'applications à long terme de GCB.

### 3) *Influence du niveau d'hydratation*

Un essai de cisaillement standard pour les GCB devrait bien spécifier la méthode utilisée pour hydrater les échantillons, de façon à exercer un certain niveau de contrôle sur la teneur en eau de la bentonite. Les résultats obtenus laissent croire qu'une augmentation absolue de la teneur en eau de 10% devrait réduire la résistance au cisaillement maximum par environ 3%, cependant cette relation n'est pas clairement définie. Également, une contrainte normale doit toujours être appliquée lors de l'hydratation des GCB, car autrement les pressions internes créées par le gonflement de la bentonite peuvent affecter les résultats obtenus en abîmant l'aiguilletage des échantillons. Une durée d'hydratation de 48 heures permet d'obtenir des teneurs en eau de la bentonite situées de 10 à 20% sous les teneurs en eau les plus élevées, obtenues après 14 jours ou plus d'hydratation. Cette durée de 48 heures offre un bon compromis entre une bonne hydratation de la bentonite et une durée d'exécution raisonnable.

Une attention particulière doit également être apportée lors de l'installation des GCB, afin d'empêcher l'hydratation de la bentonite de se produire avant qu'une contrainte normale ne soit appliquée. Même une pluie relativement faible peut être suffisante pour réduire un facteur de sécurité, à l'origine assez confortable contre l'instabilité d'un ouvrage, en un équilibre précaire entre une performance adéquate et une rupture catastrophique.

### 4) *Relation entre le pelage et la résistance au cisaillement interne*

On a observé que l'angle de friction interne d'un GCB était relié à la résistance au pelage. Cependant, l'angle de friction interne ne peut pas être évalué simplement par un test de pelage, étant donné que la valeur de l'angle varie en fonction de la teneur en eau de la bentonite et que le test de pelage ne tient pas compte de l'effet de la bentonite sur la résistance au cisaillement.

## BIBLIOGRAPHIE

Annual Book of ASTM Standards. (1995). Section 4, Vol. 04-08 et 04-09, ASTM, Philadelphie.

ASTM Standards and Other Specifications and Test Methods on the Quality Assurance of Landfill Liner Systems. (1994), ASTM, Philadelphie, 530 p.

BÉRARD, J.-F. (1997). Evaluation of needle punched geosynthetic clay liners' internal friction. Proceedings, Geosynthetics' 97, Long Beach, CA, 351-362.

Compte-Rendu du Séminaire: Les géocomposites bentonitiques. (1995), Publication Technique 9525a, Sageos, Saint-Hyacinthe, Québec.

DANIEL, D. E. (1993). Geotechnical Practice for Waste Disposal. Chapman & Hall, 683 p.

DANIEL, D. E., BOARDMAN, B. T. (1993). Report of Workshop on Geosynthetic Clay Liners. U.S. EPA, Cincinnati, OH, EPA/600/R-93/171, 106 p.

DANIEL, D. E., SCRANTON, H. B. (1996). Report of 1995 Workshop on Geosynthetic Clay Liners. U.S. EPA, Cincinnati, OH, EPA/600/R-96/149, 228 p.

DANIEL, D. E., SHAN, H.-Y. (1991). Results of direct shear tests on hydrated bentonitic blankets. Project Report, Geotechnical Engineering Center, Université du Texas à Austin.

DANIEL, D. E., SHAN, H.-Y., ANDERSON, J. D. (1993). Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner. Proceedings, Geosynthetics' 93, Vancouver, B. C., 1483-1496.

EITH, A. W., BOSCHUK, J., KOERNER, R. M. (1991). Prefabricated Bentonite Clay Liners. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 10, No. 5-6, International Geotextile Society, 575-599.

FROBEL, R. K., TAYLOR, R. T. (1991). CSPE/Geotextile Geocomposites. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 10, No. 5-6, International Geotextile Society, 443-457.

Geosynthetic Research Institute.(1991). Progress report #3 - prefabricated clay (PBC) liner test program. Drexel University, Philadelphie, Pa.

GILBERT, R. B., FERNANDEZ, F., HORSFIELD, D. W. (1996). Shear Strength of Reinforced Geosynthetic Clay Liner. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 4, 259-266.

GRAY, D. H., OHASHI, H. (1983). Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 3, 335-353.

HEERTEN, G., SAATHOFF, F., SCHEU, C., VON MAUBEUGE, K. (1994). On the long-term shear behaviour of geosynthetic clay liners (GCLs) in capping sealing systems. International GCL Symposium, Nürnberg.

HOLTZ, R. D., KOVACKS, W.D. (1981). Introduction à la géotechnique. Traduit par Jean Lafleur (1991), Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 808 p.

KOERNER, R. M. (1994). Designing with Geosynthetics. Troisième Édition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 783 p.

MESRI, G., OLSON, R. E. (1970). Shear Strength of Montmorillonite. Géotechnique, Vol. 20, No. 3, 261-270.

MITCHELL, K. J. (1993). Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley and Sons, Inc., 437 p.

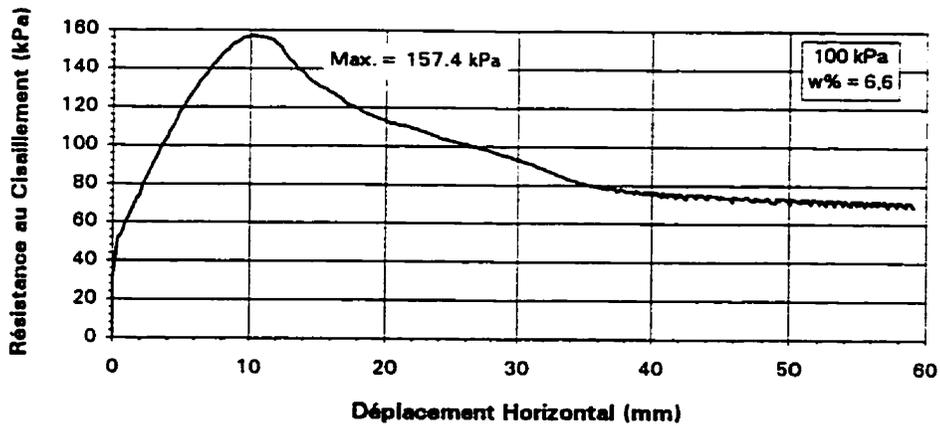
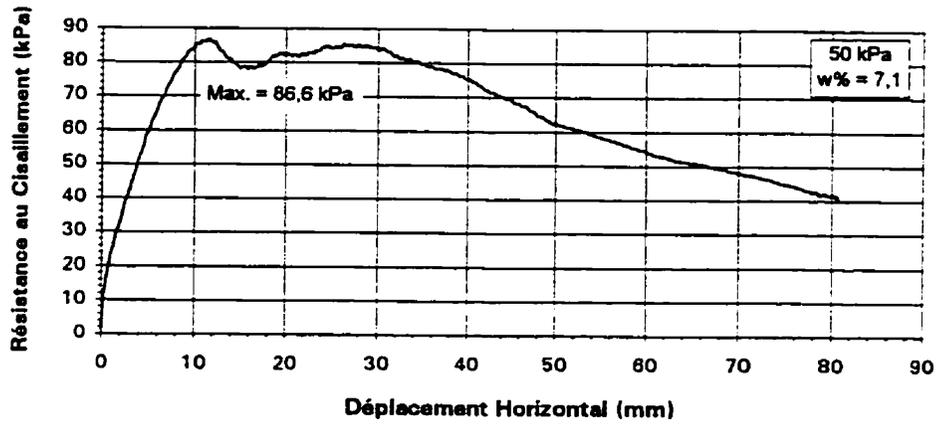
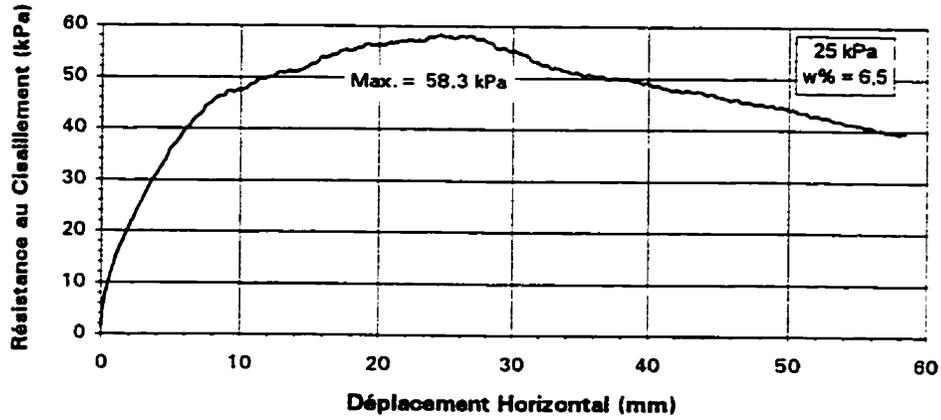
Monograph, National Formulary XVII. (1989), U.S. Pharmacopeial Convention, Inc.

SHAN, H.-Y. (1990). Laboratory tests on a bentonite blanket. MSCE Thesis, Université du Texas à Austin.

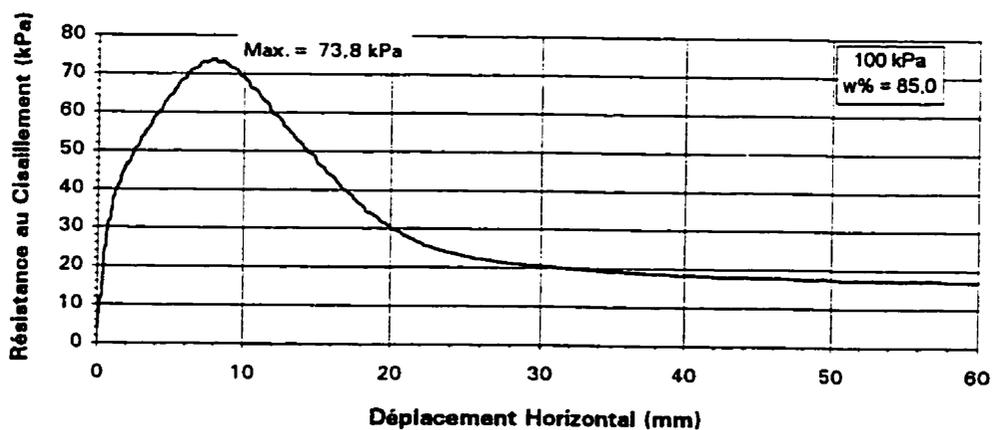
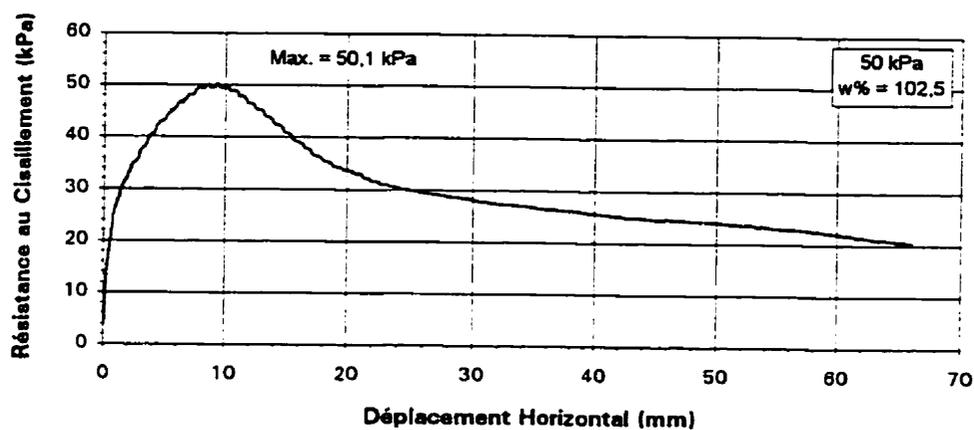
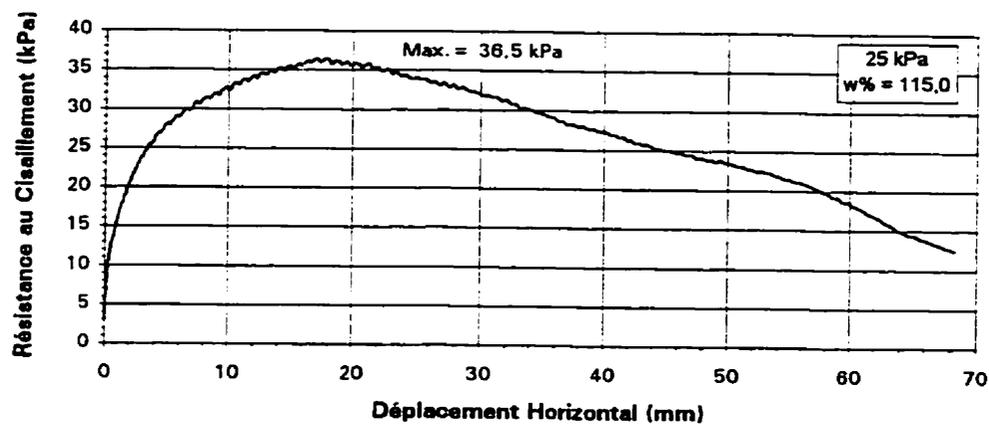
**ANNEXE I**

**ESSAIS DE RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT DIRECT**

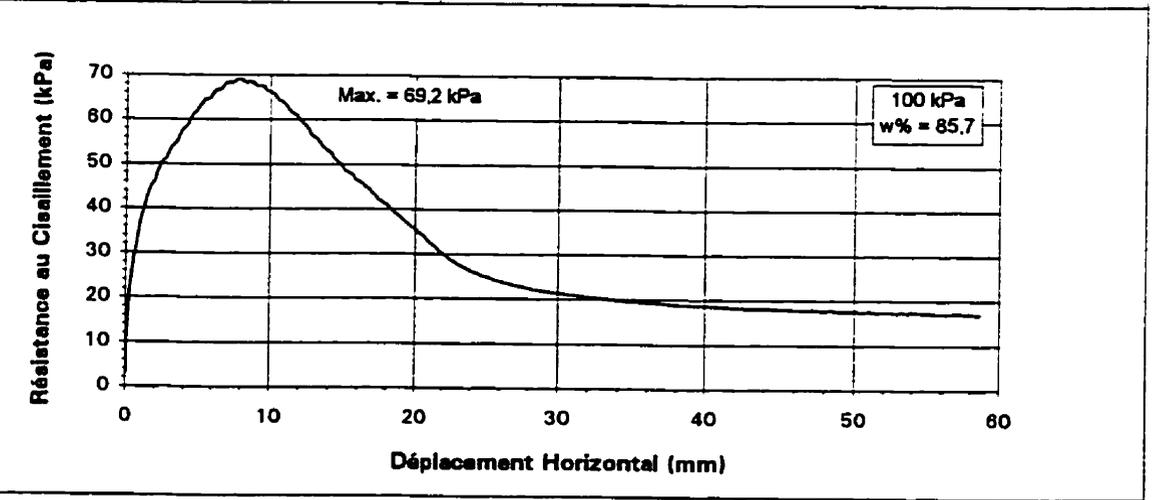
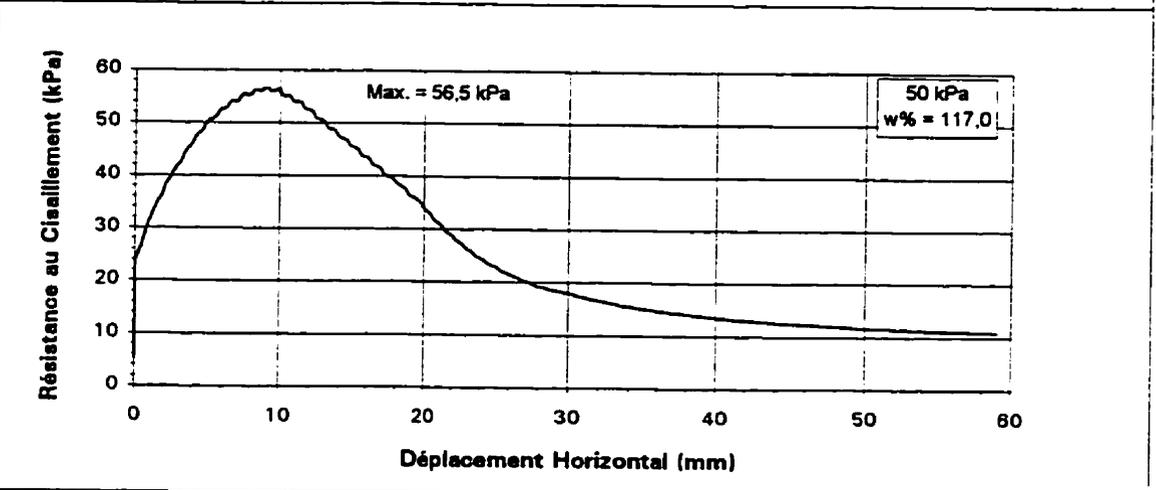
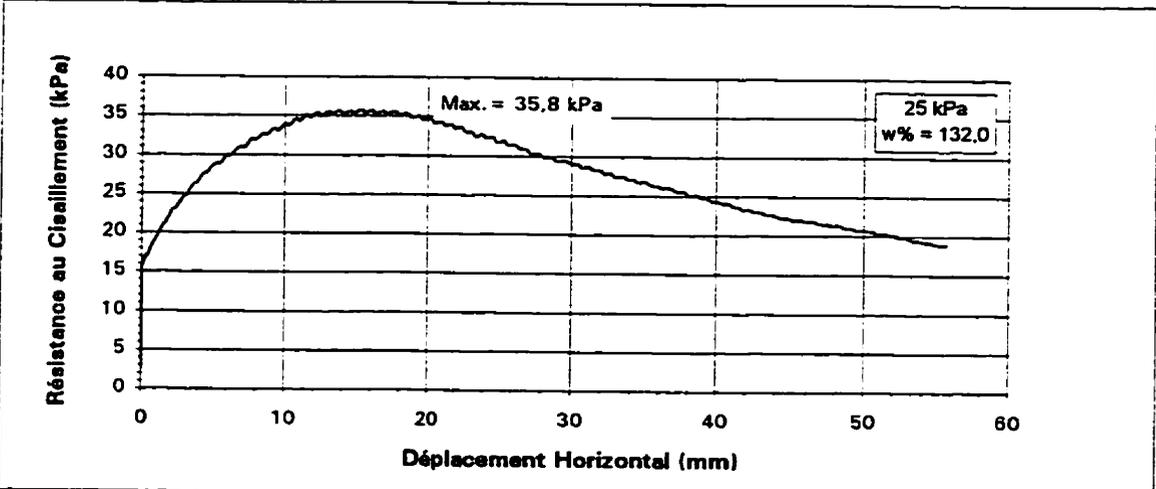
GCB no.: 1  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: sec



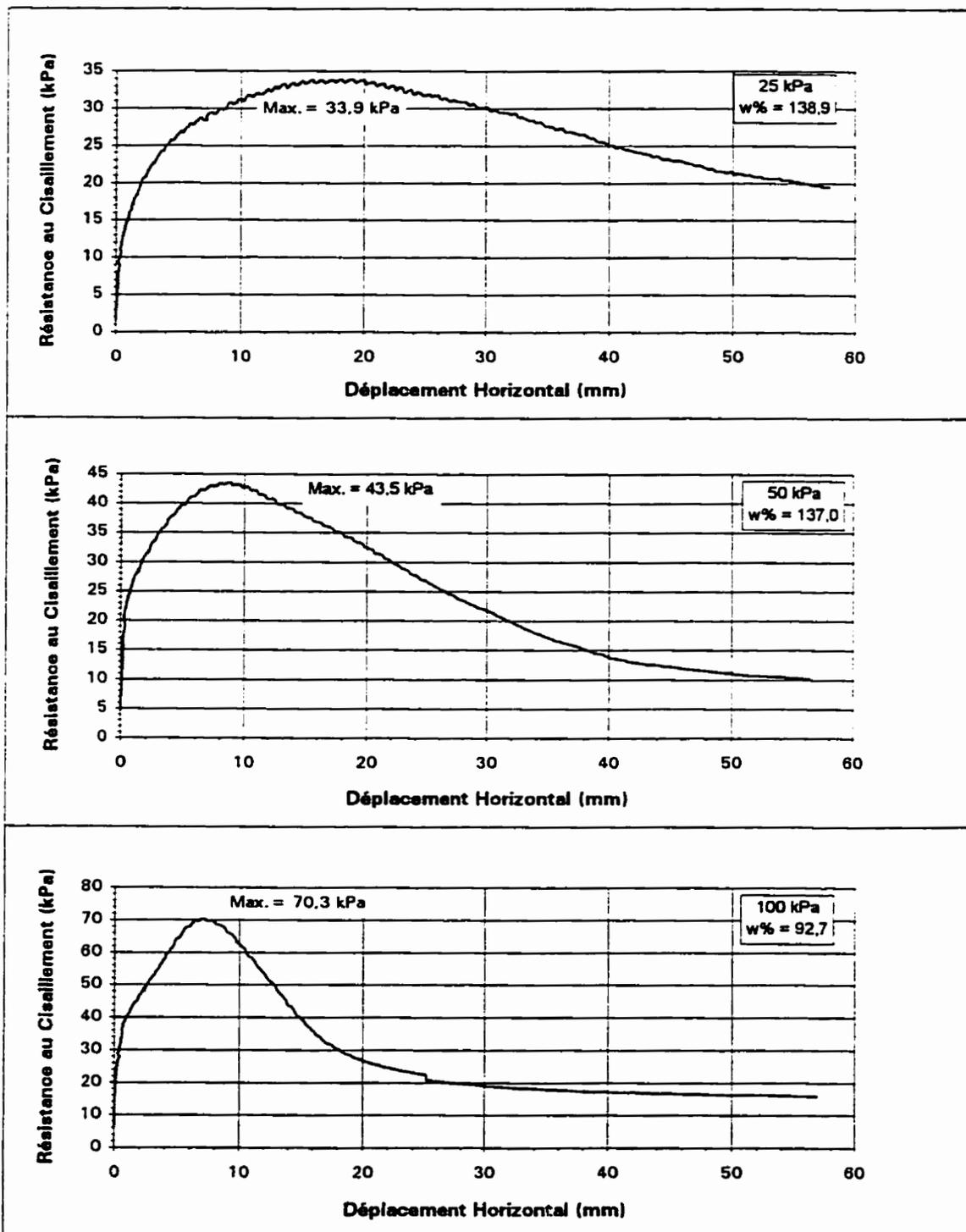
GCB no.: 1  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



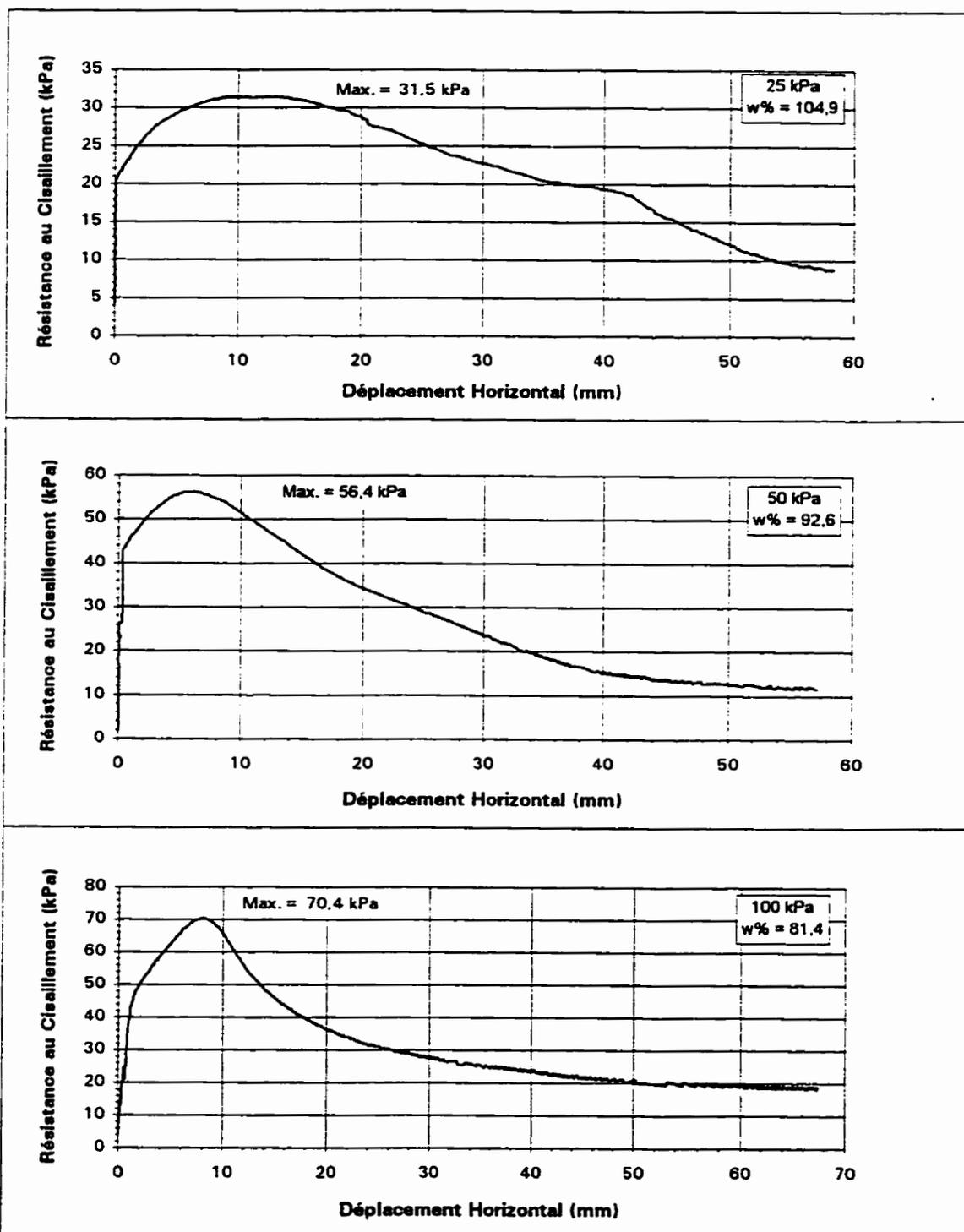
GCB no.: 1  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 48 heures



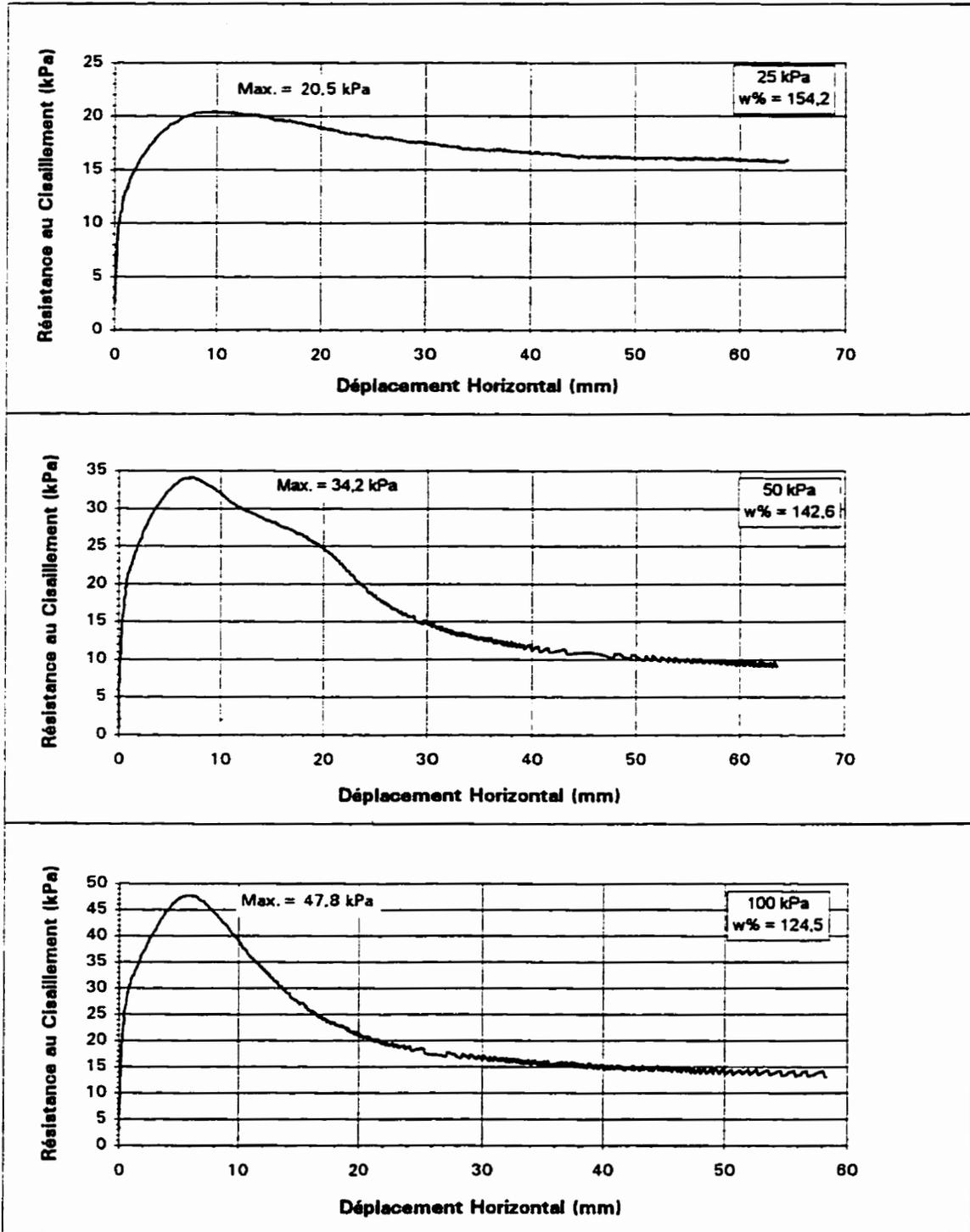
GCB no.: 1  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



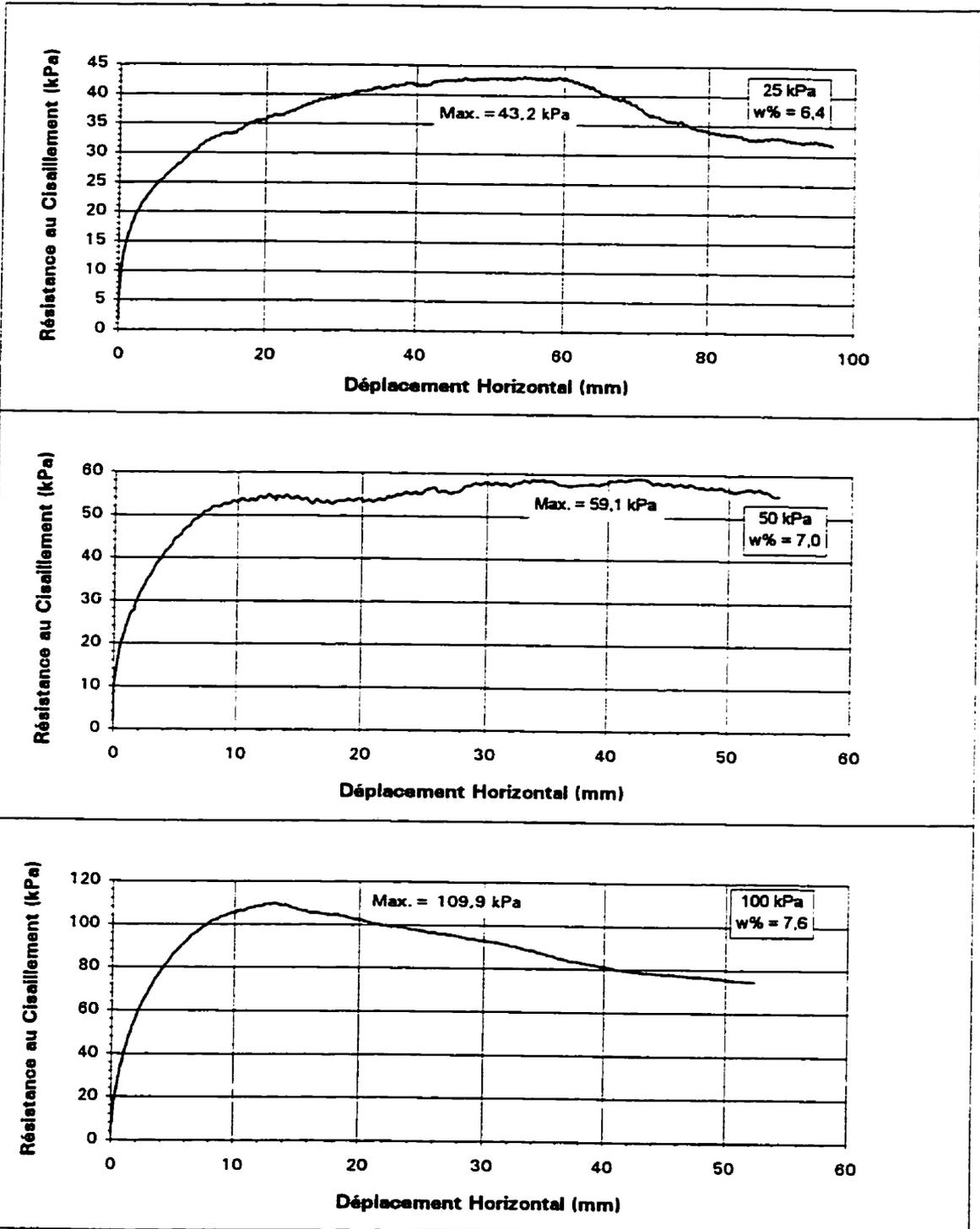
GCB no.: 1  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



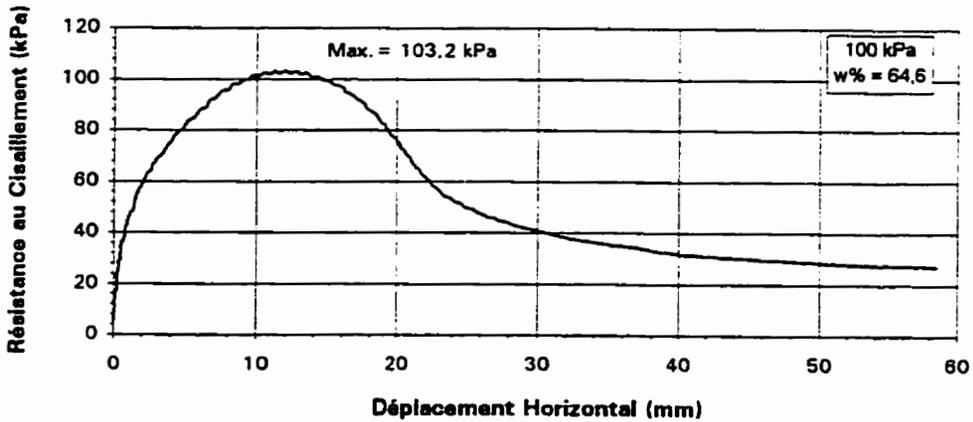
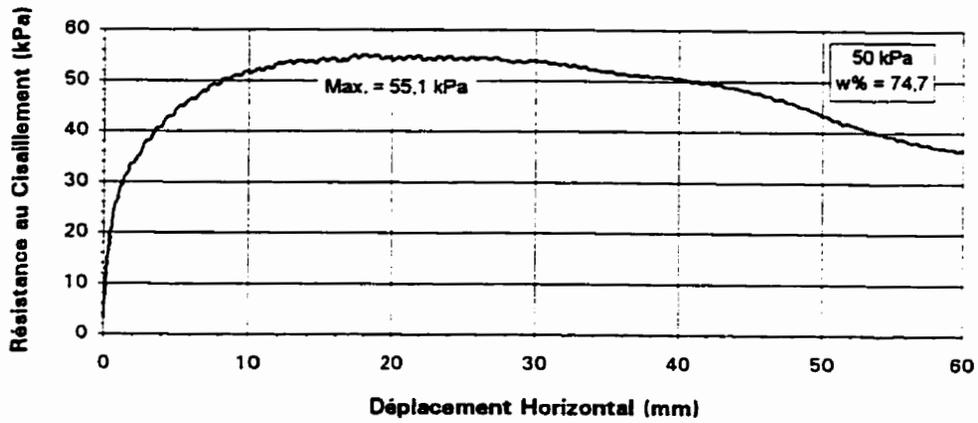
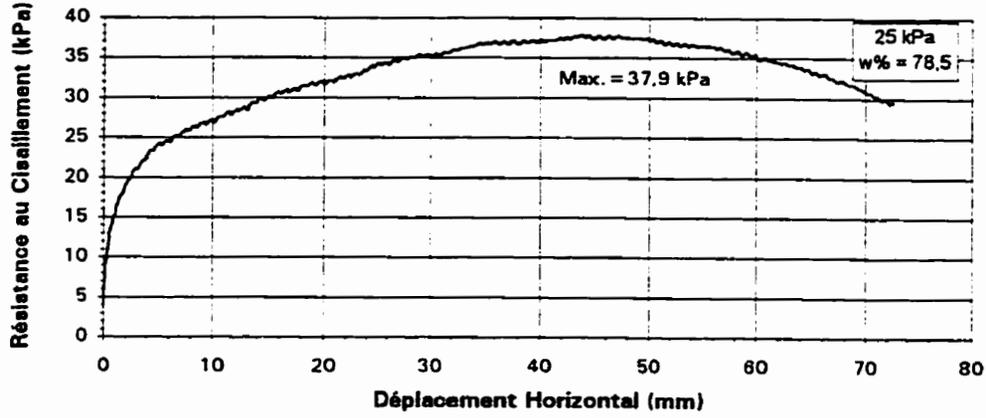
GCB no.: 1  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



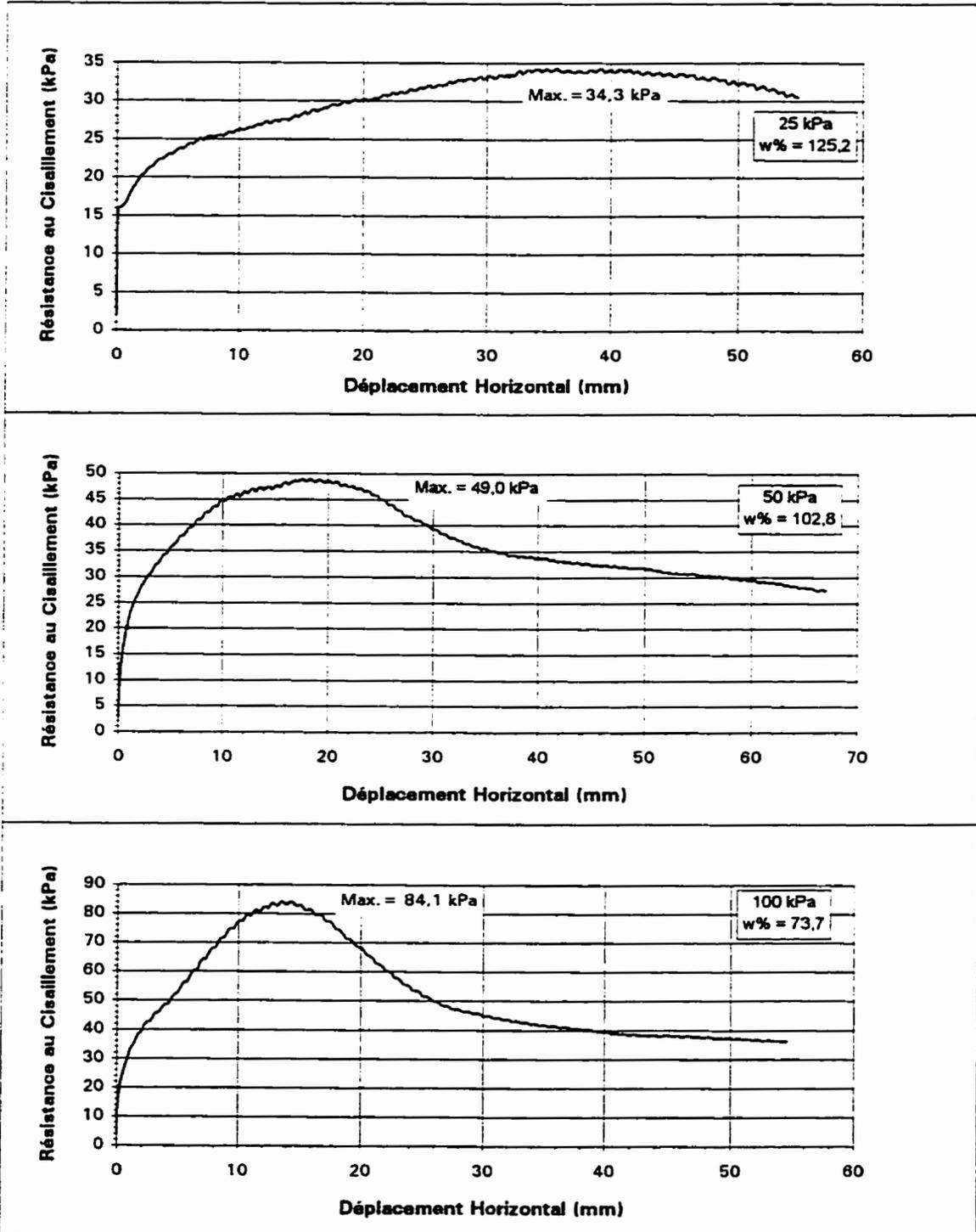
GCB no.: 2  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: sec



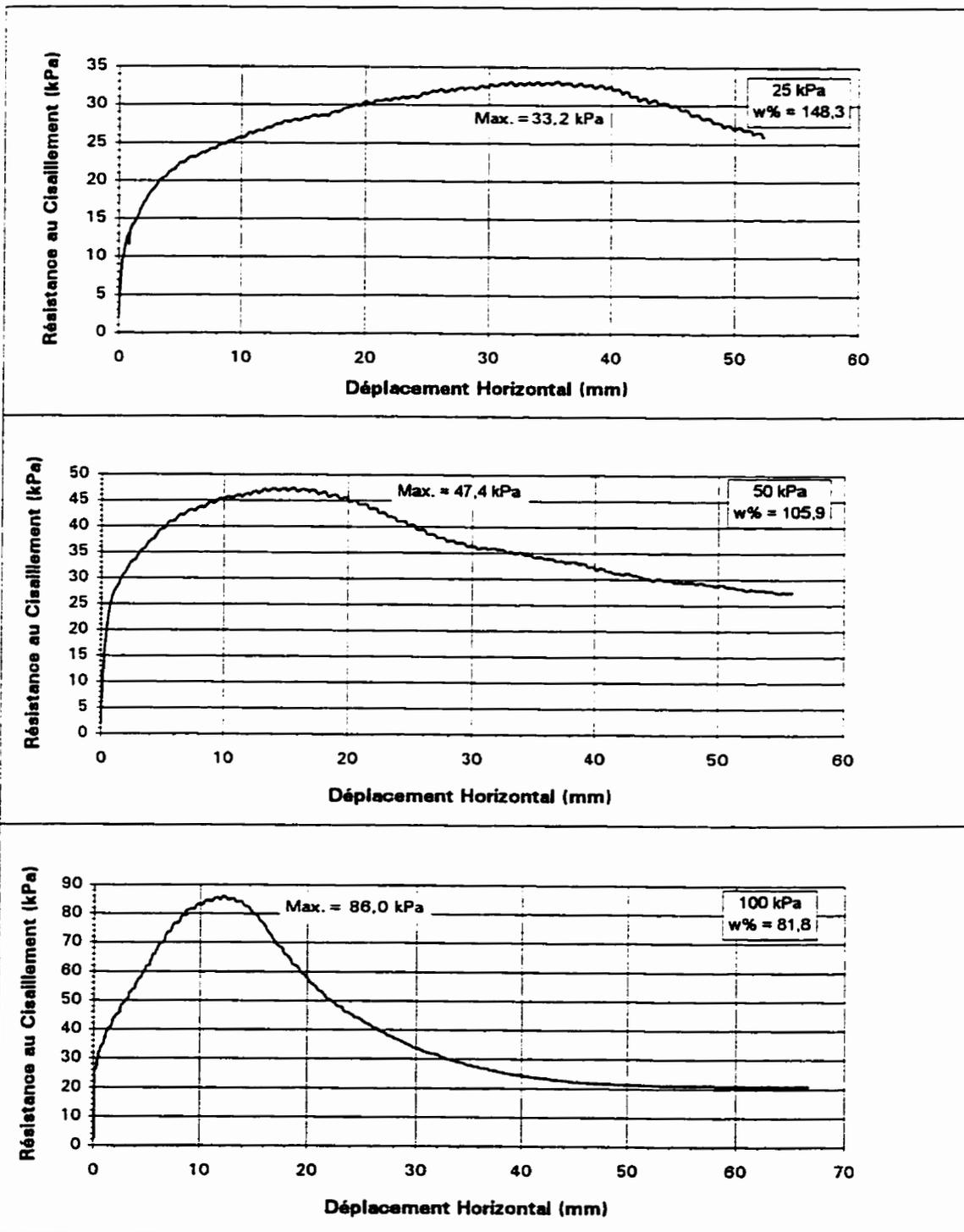
GCB no.: 2  
 Vitesse: 1 mm/min  
 Hydratation: 14 heures



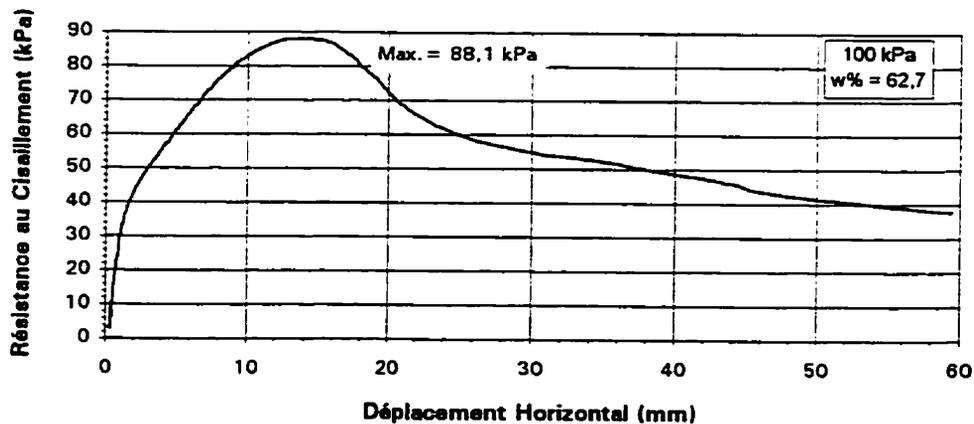
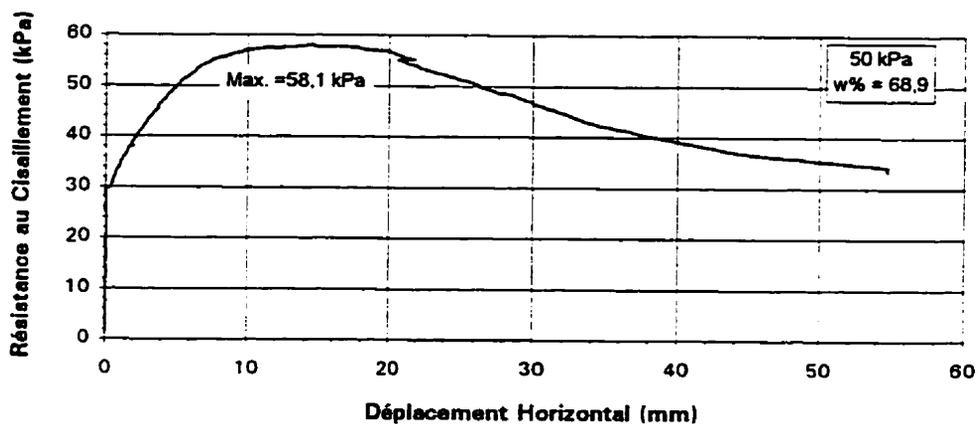
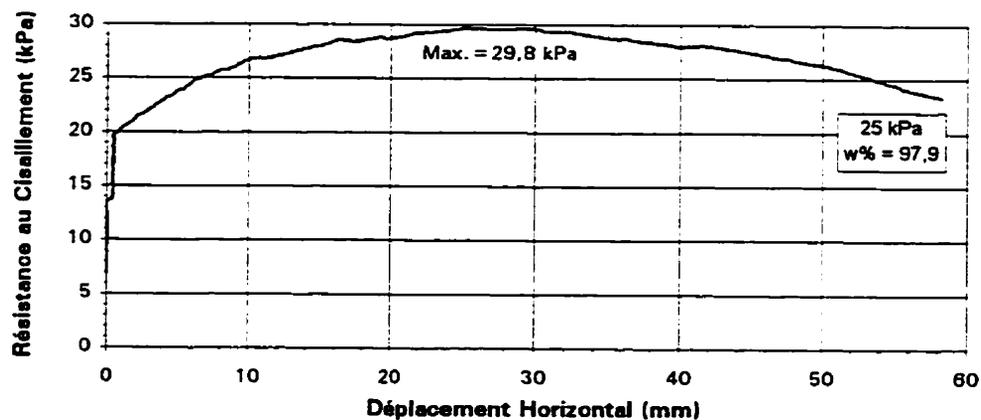
GCB no.: 2  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 48 heures



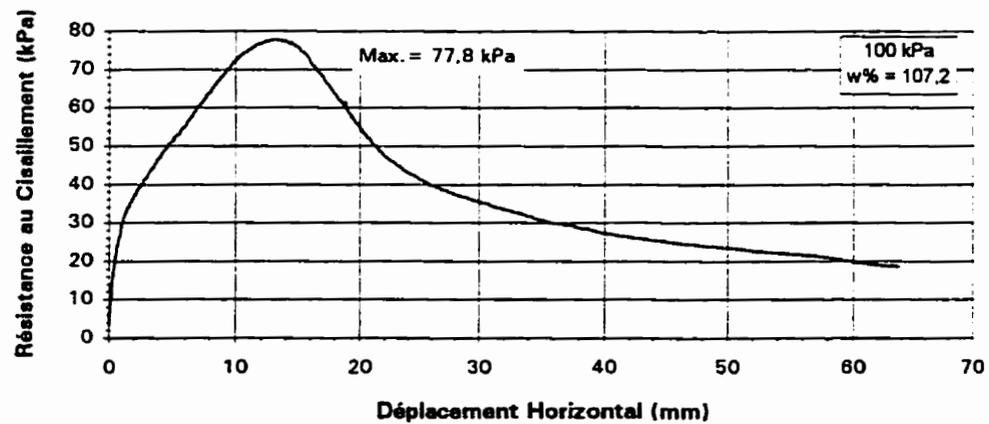
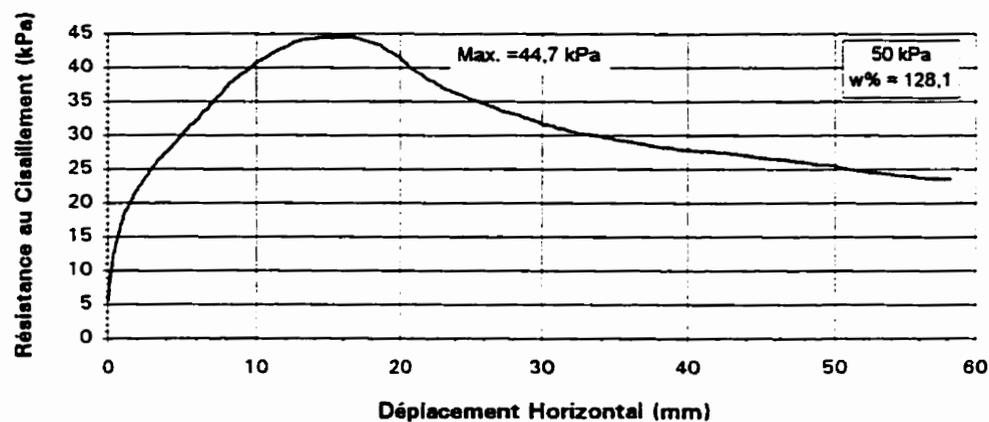
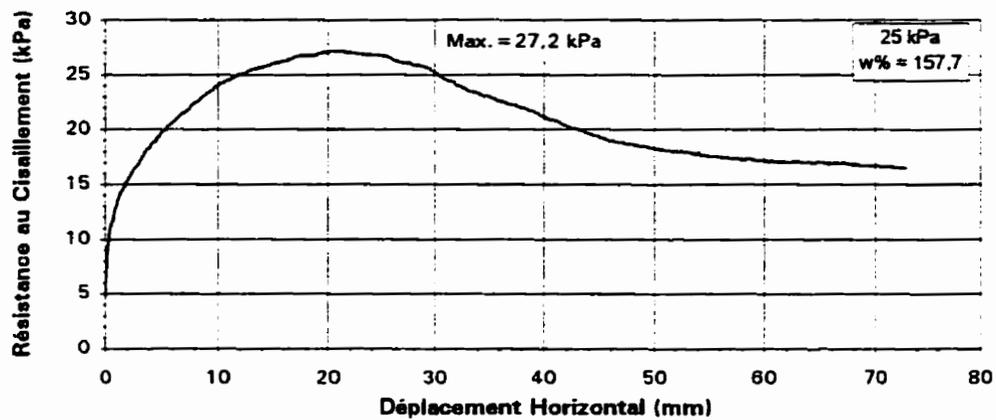
GCB no.: 2  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



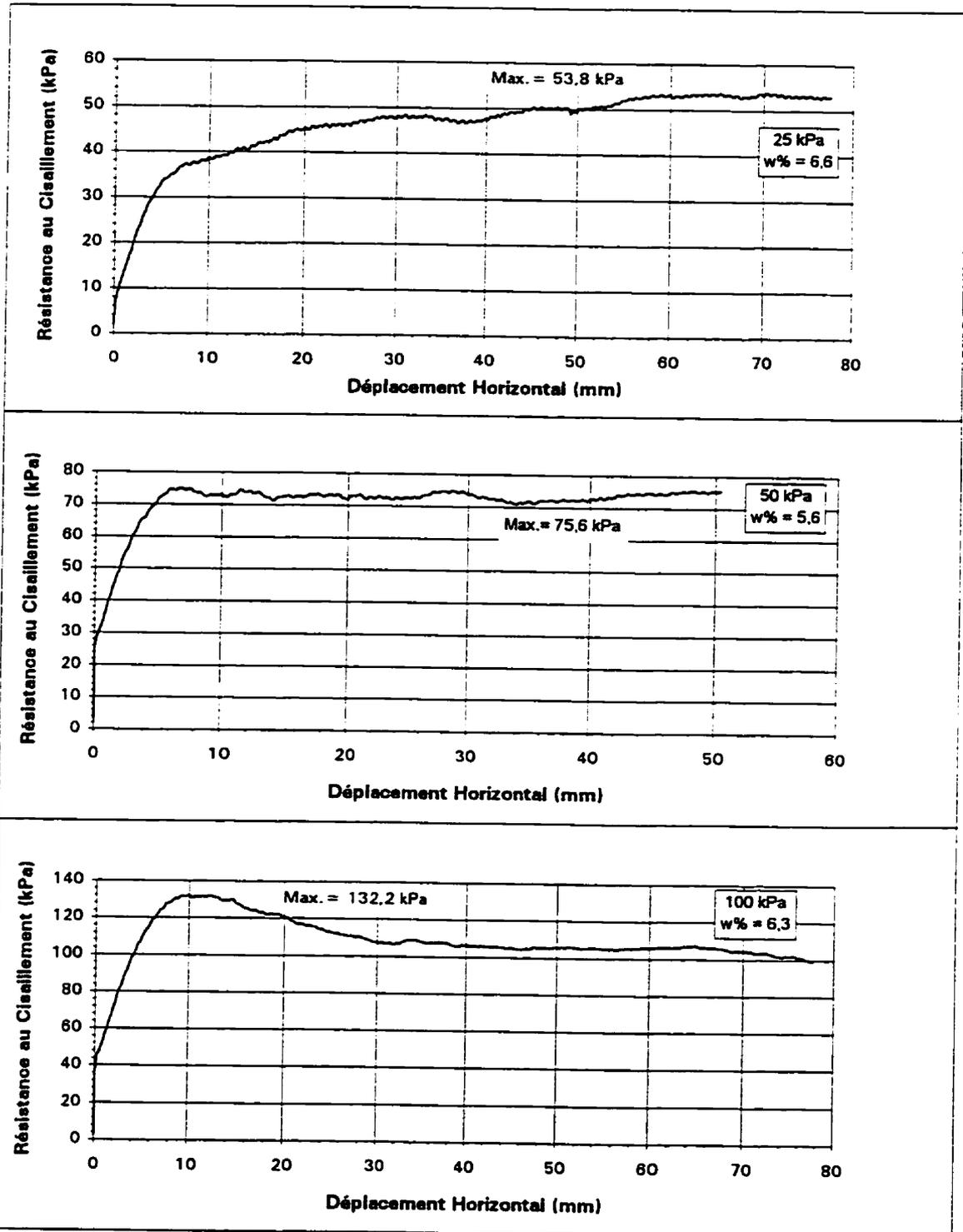
GCB no.: 2  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



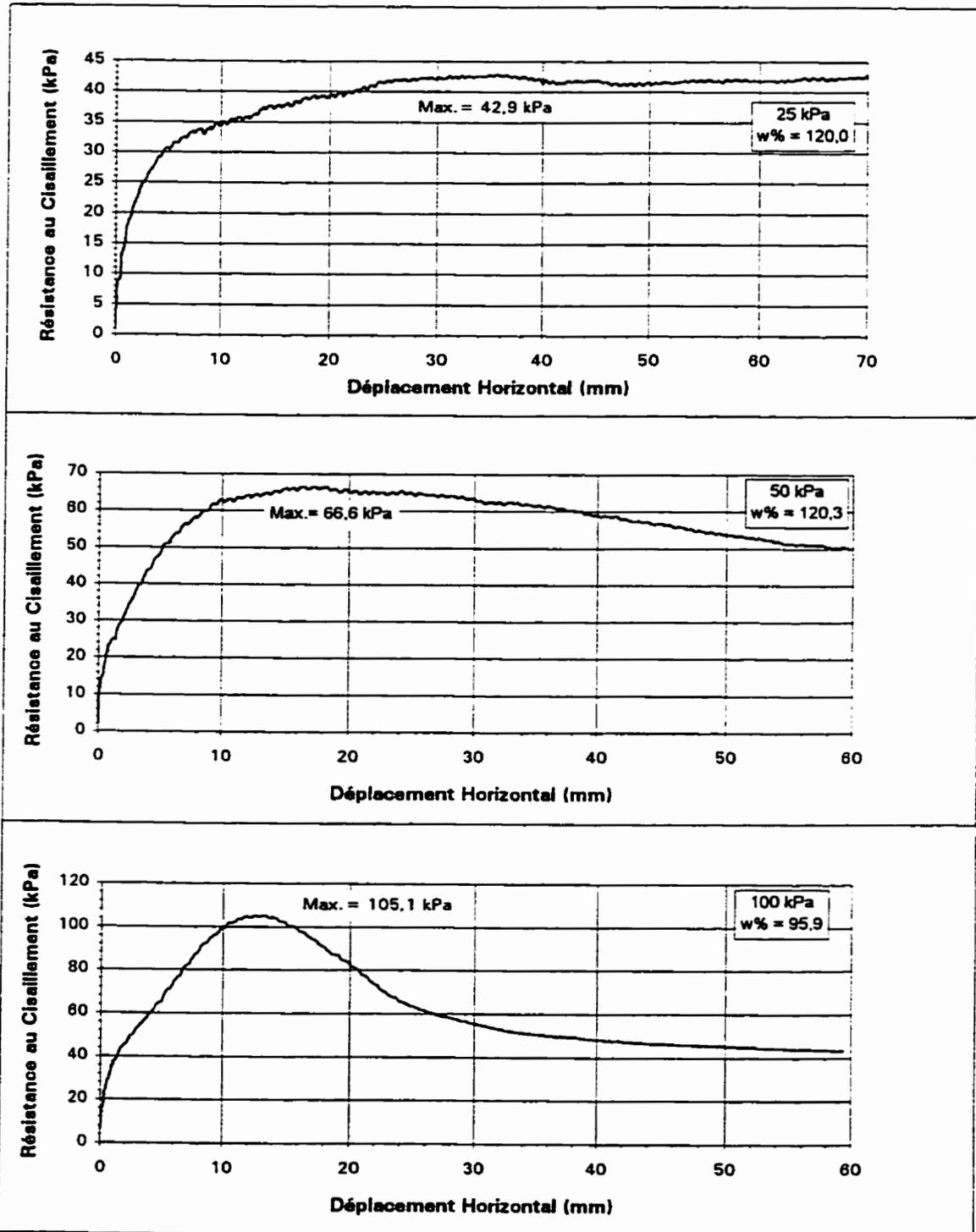
GCB no.: 2  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



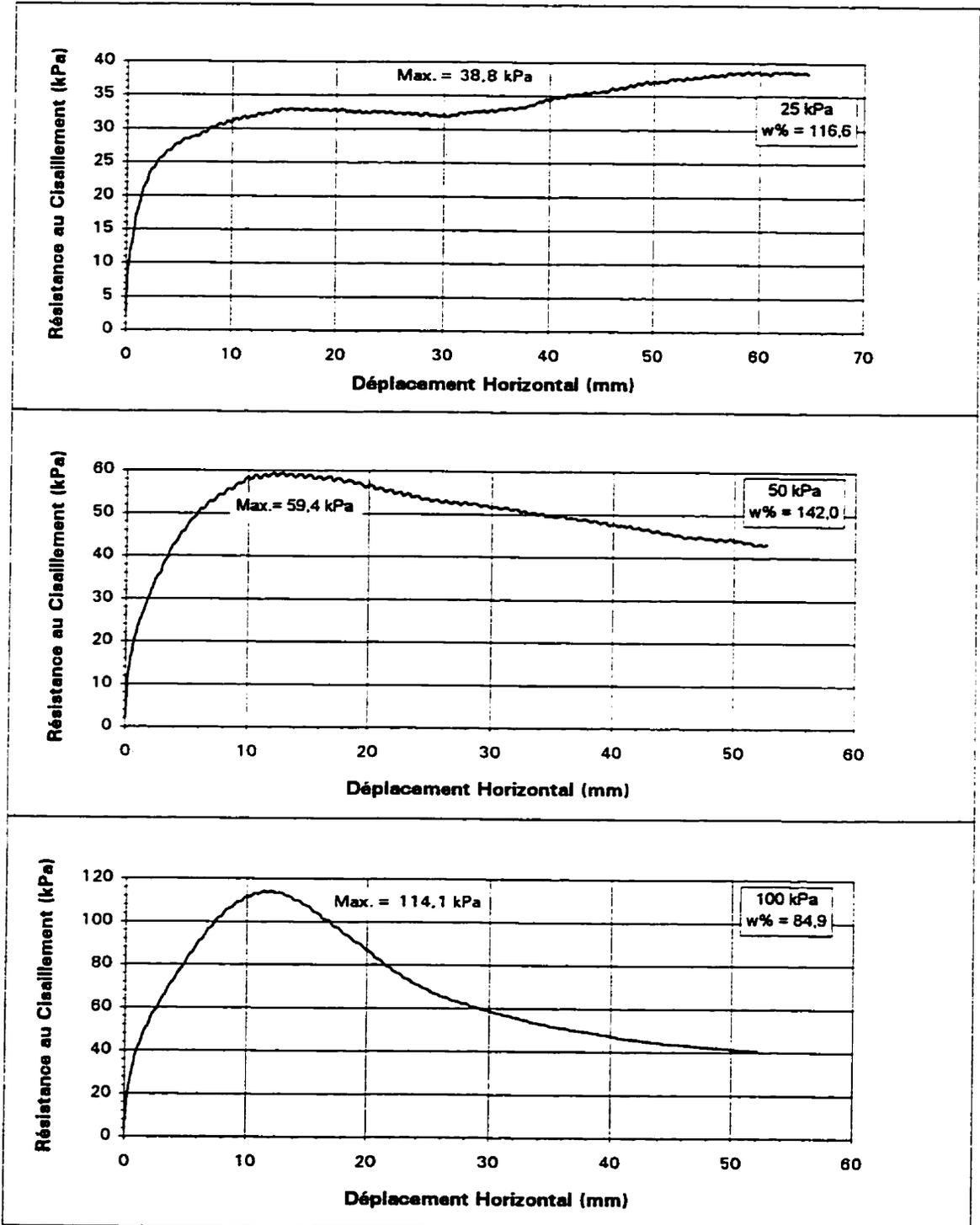
GCB no.: 3  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: sec



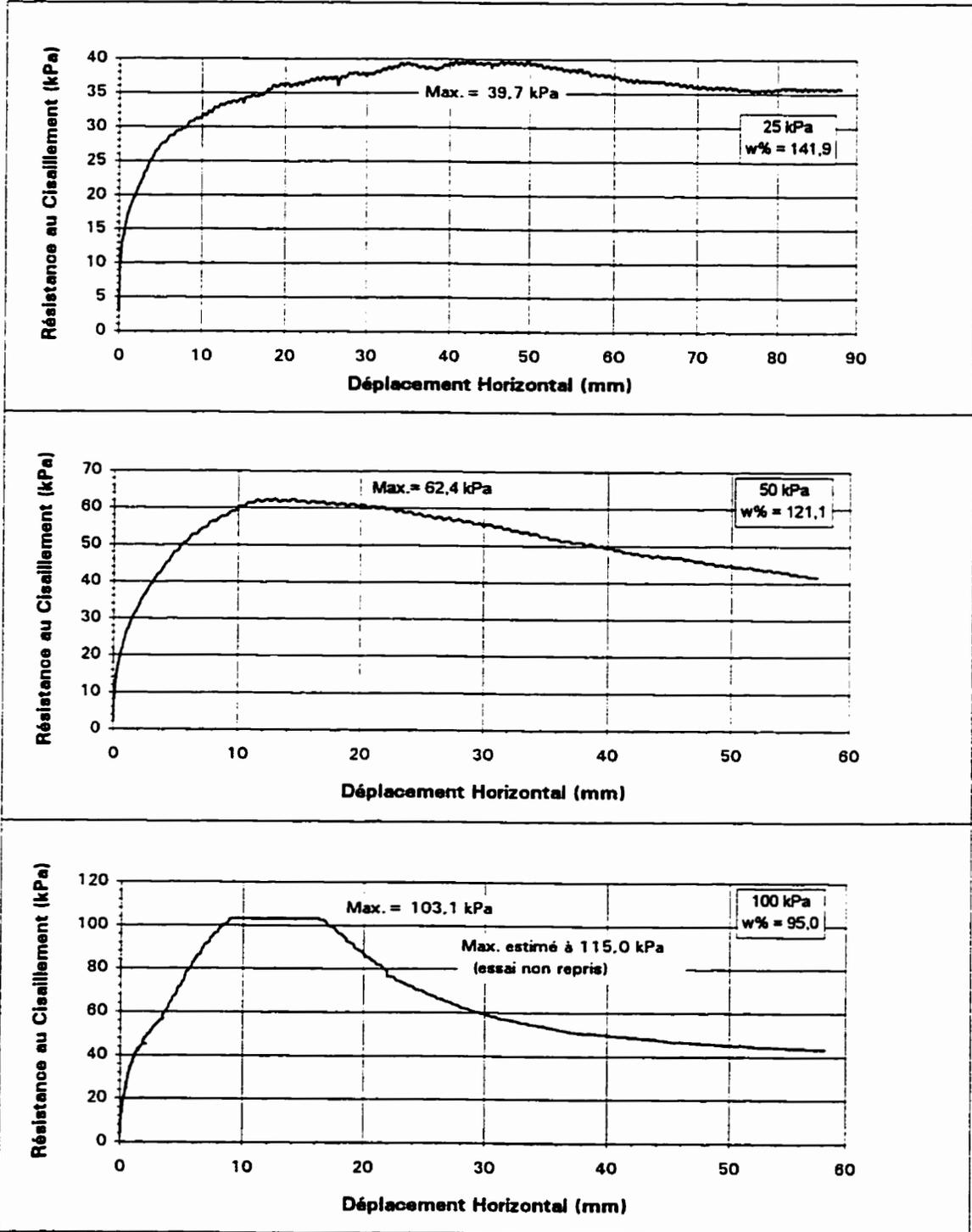
GCB no.: 3  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



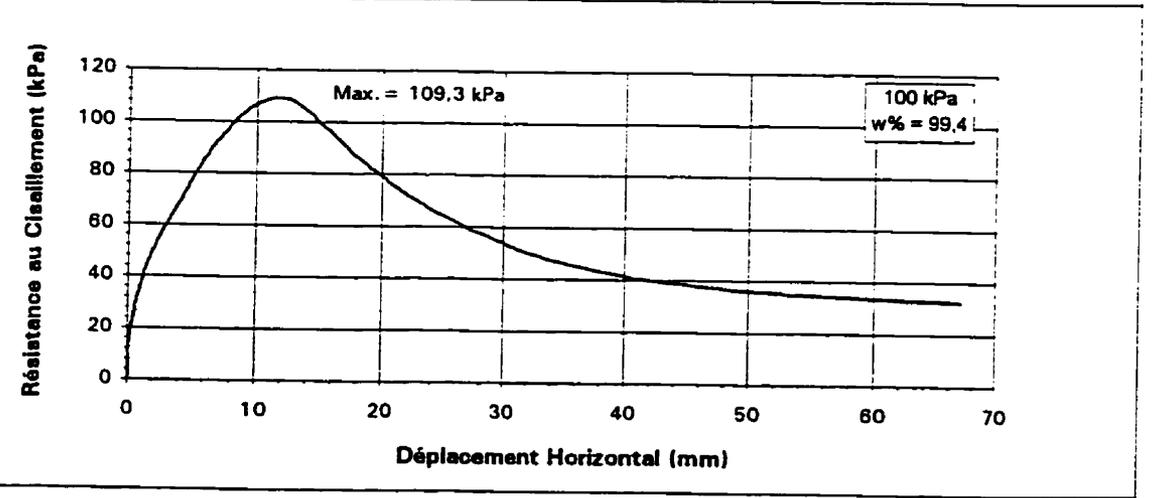
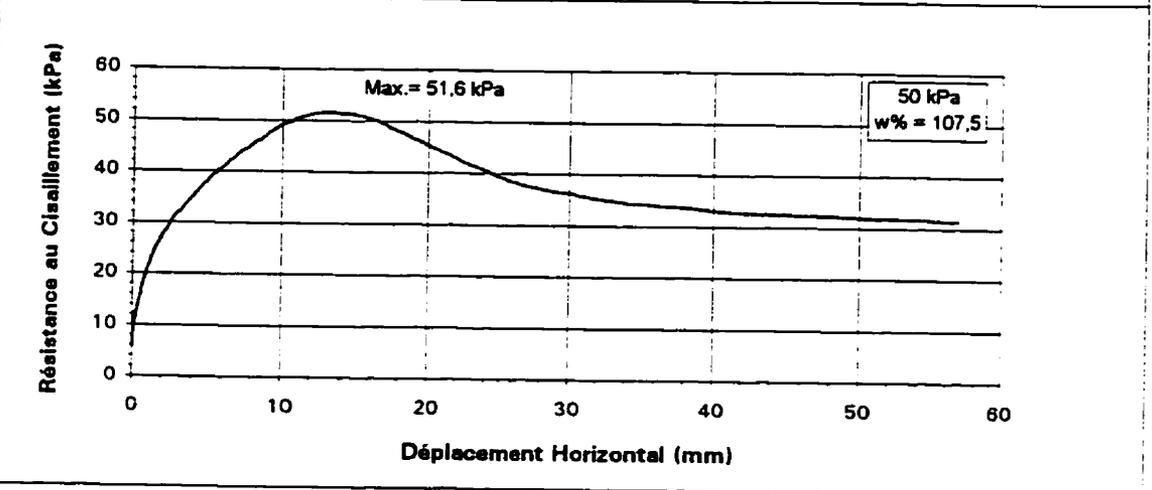
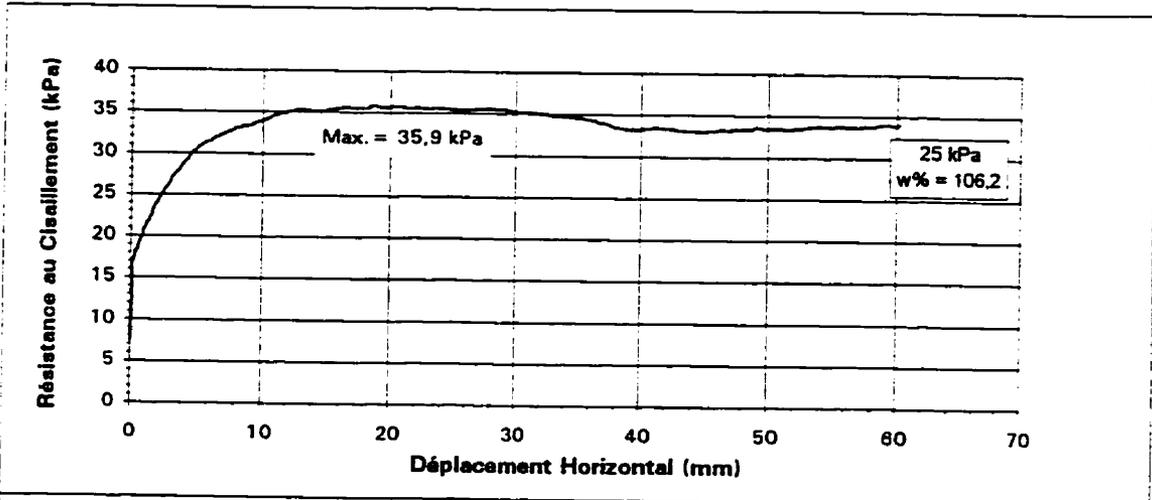
GCB no.: 3  
 Vitesse: 1 mm/min  
 Hydratation: 48 jours



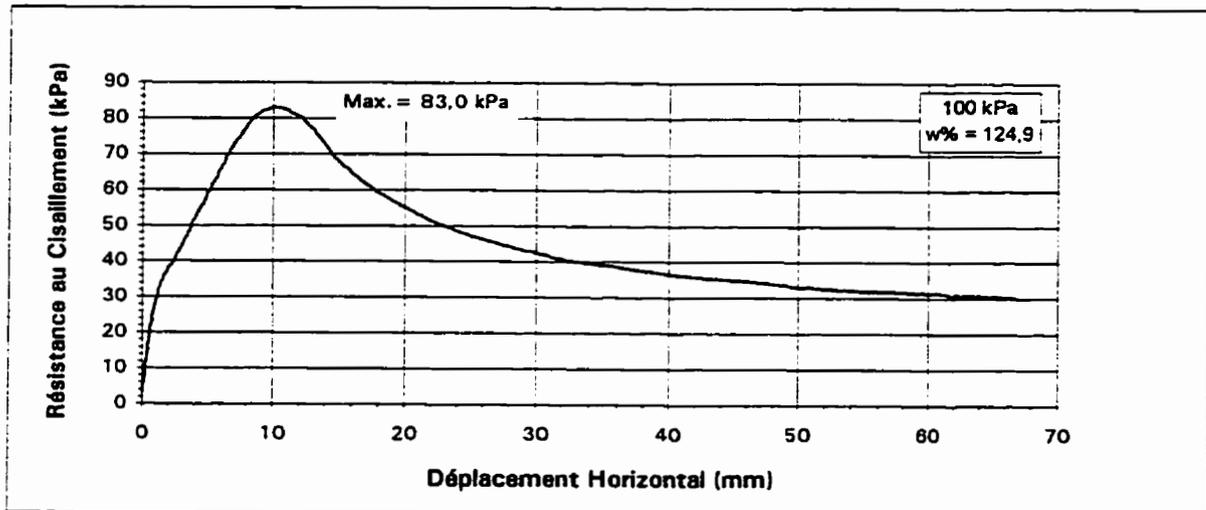
GCB no.: 3  
 Vitesse: 1 mm/min  
 Hydratation: 14 jours et +



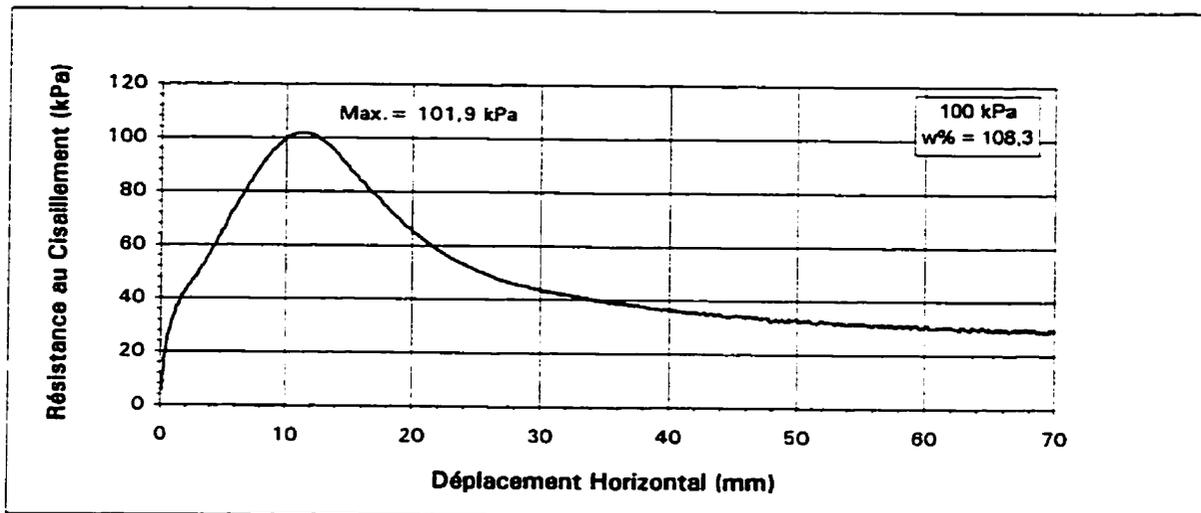
GCB no.: 3  
 Vitesse: 0,1 mm/min  
 Hydratation: 14 heures



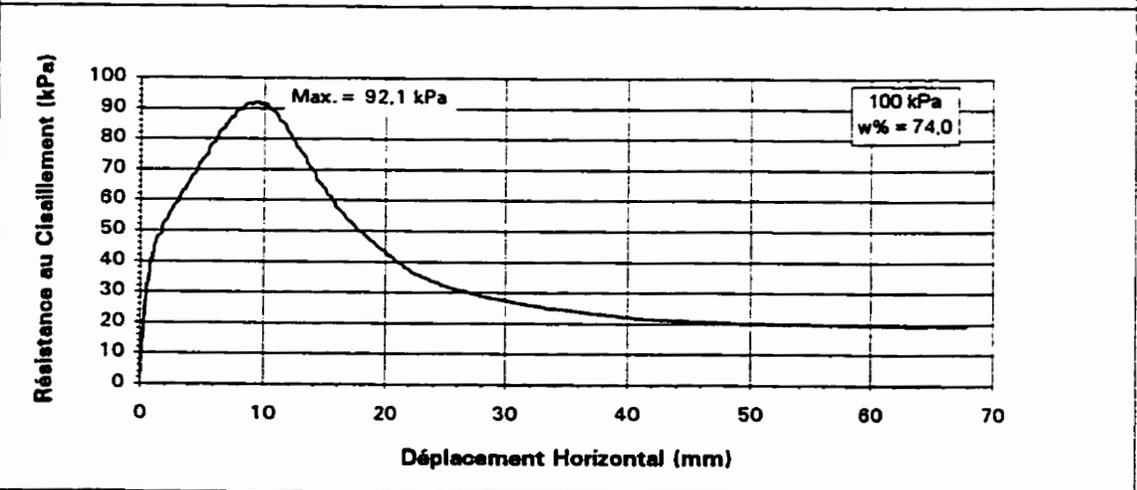
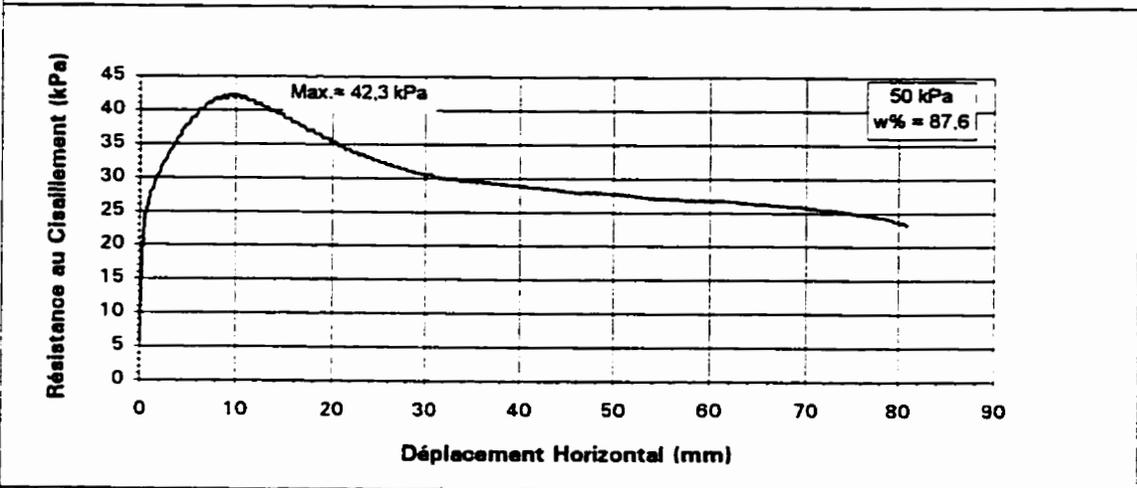
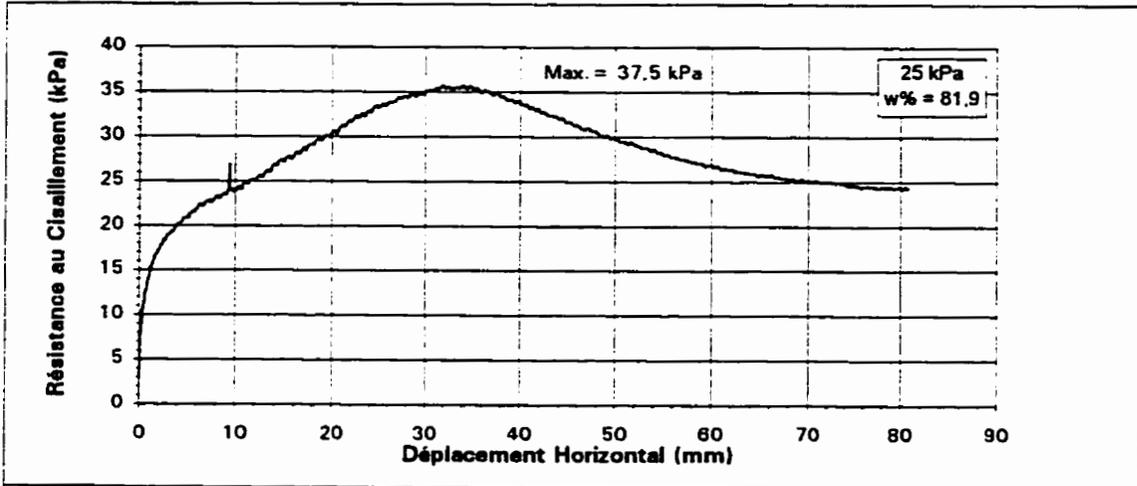
GCB no.: 3  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



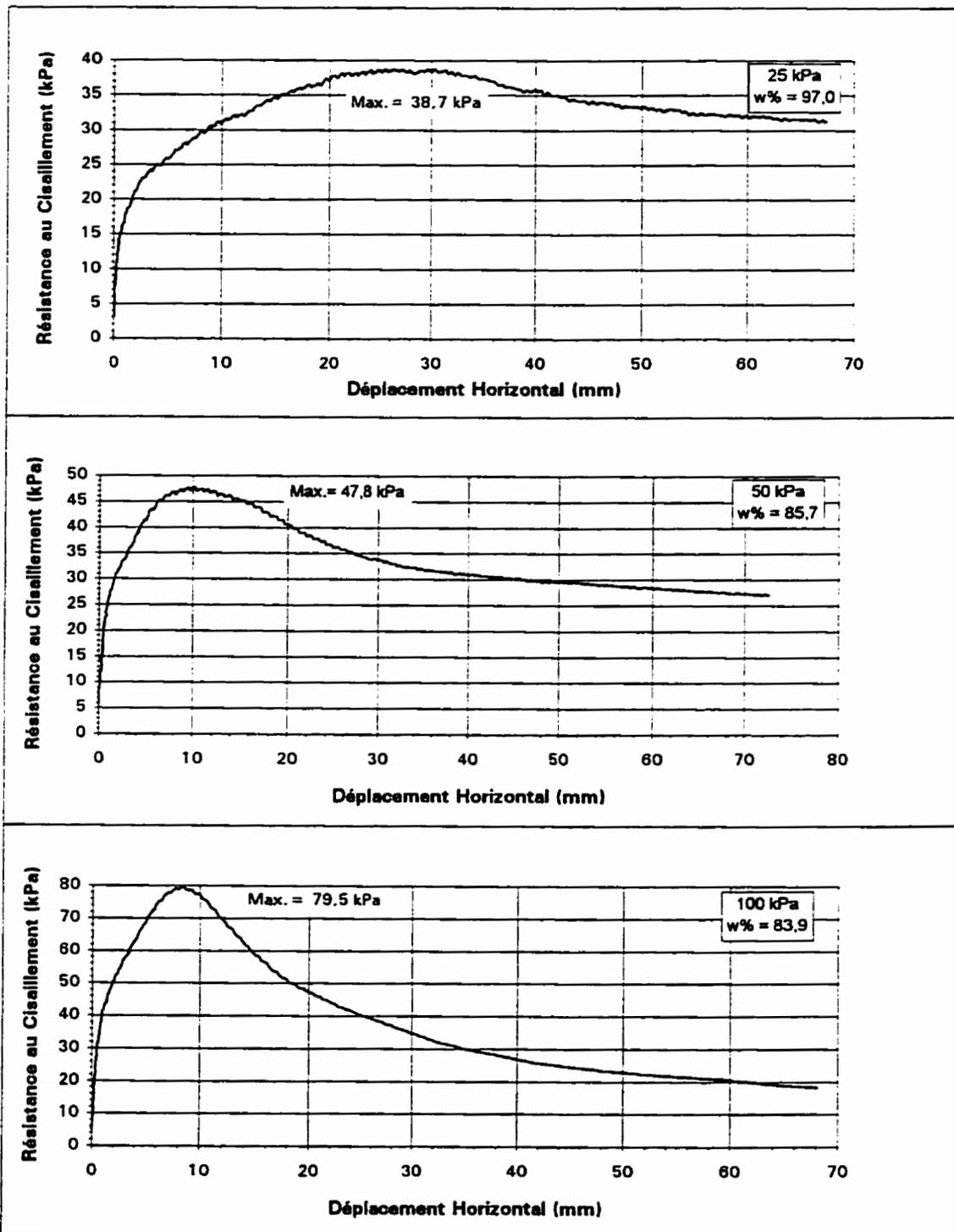
GCB no.: 3  
Vitesse: 0,01 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



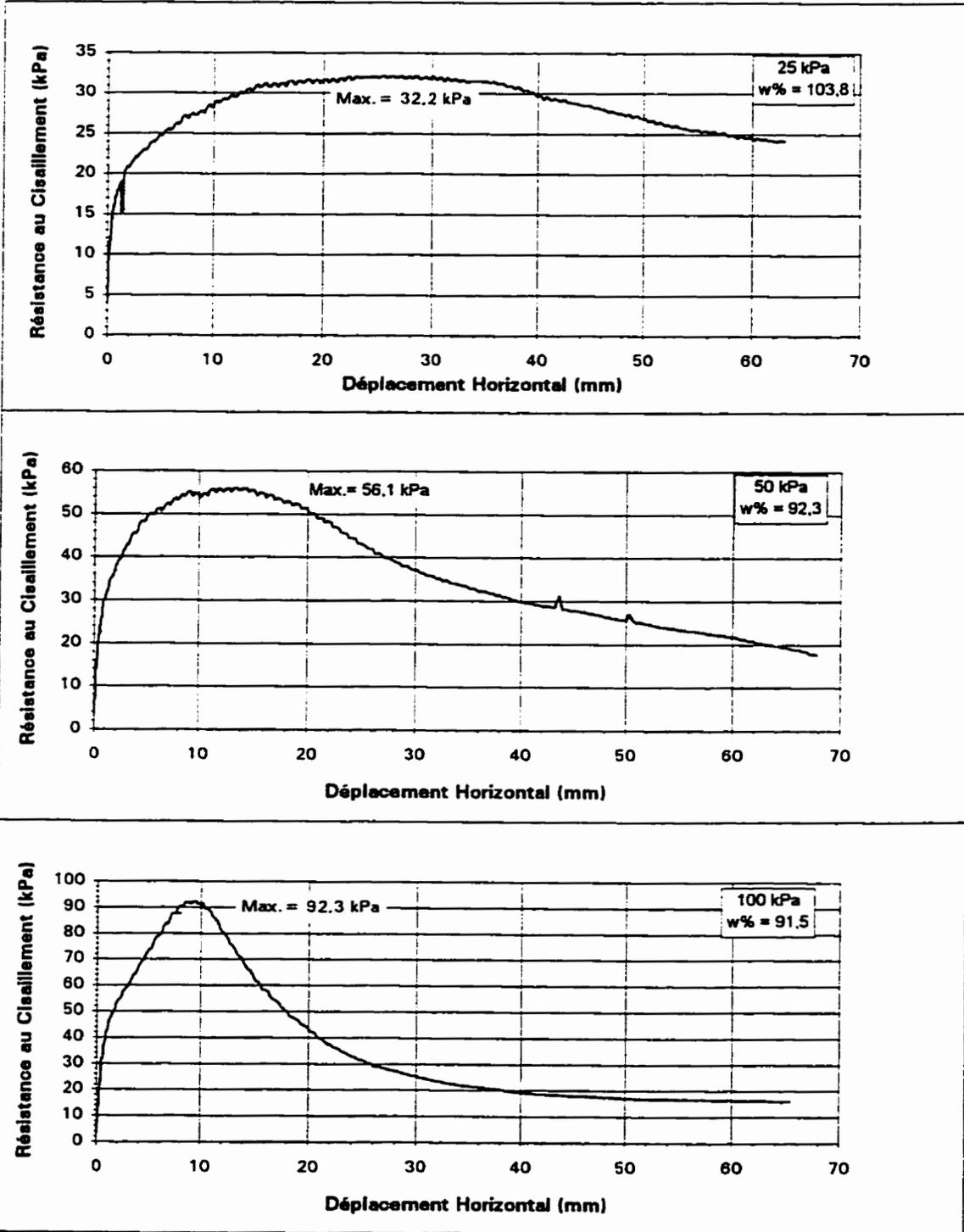
GCB no.: 4  
 Vitesse: 1 mm/min  
 Hydratation: 2 heures



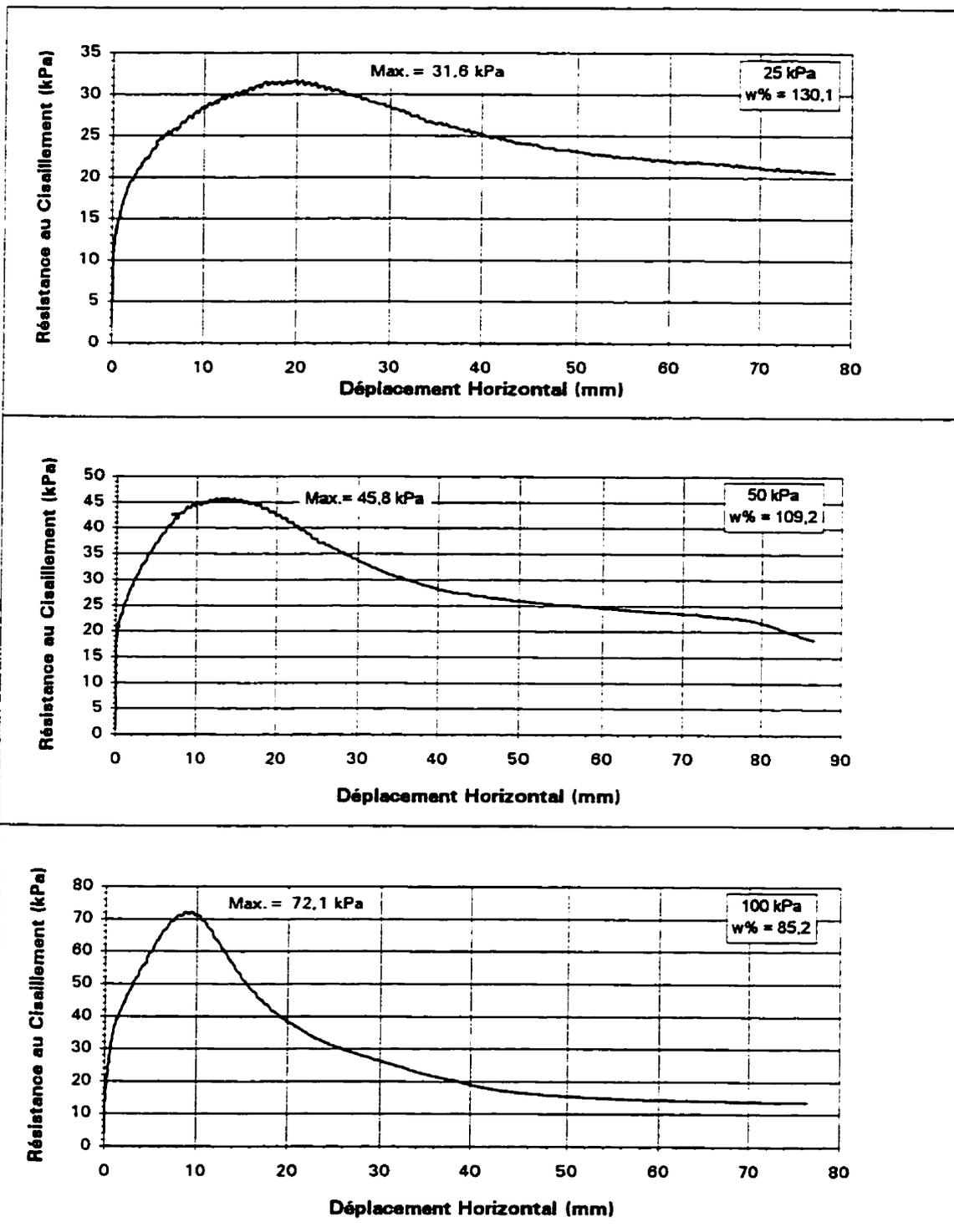
GCB no.: 4  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



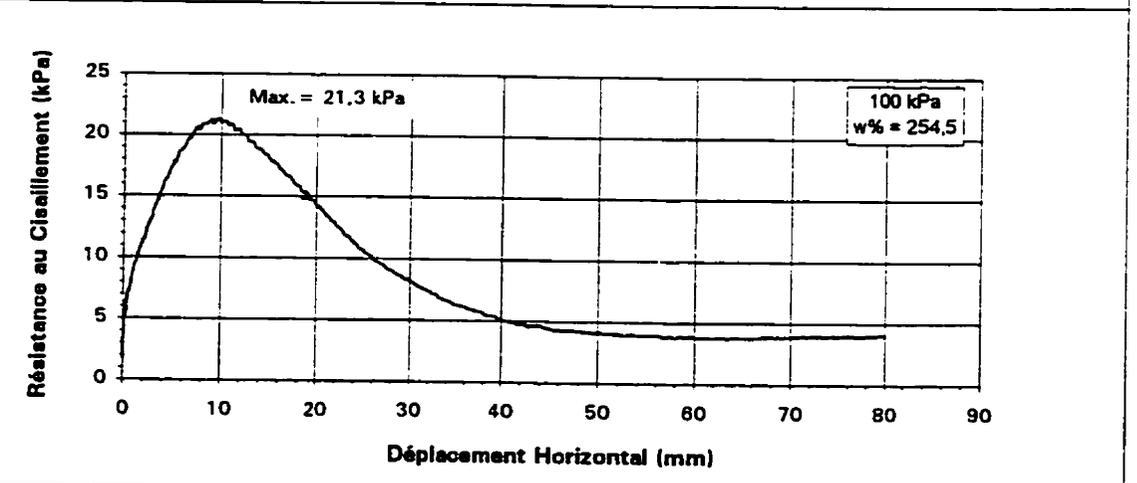
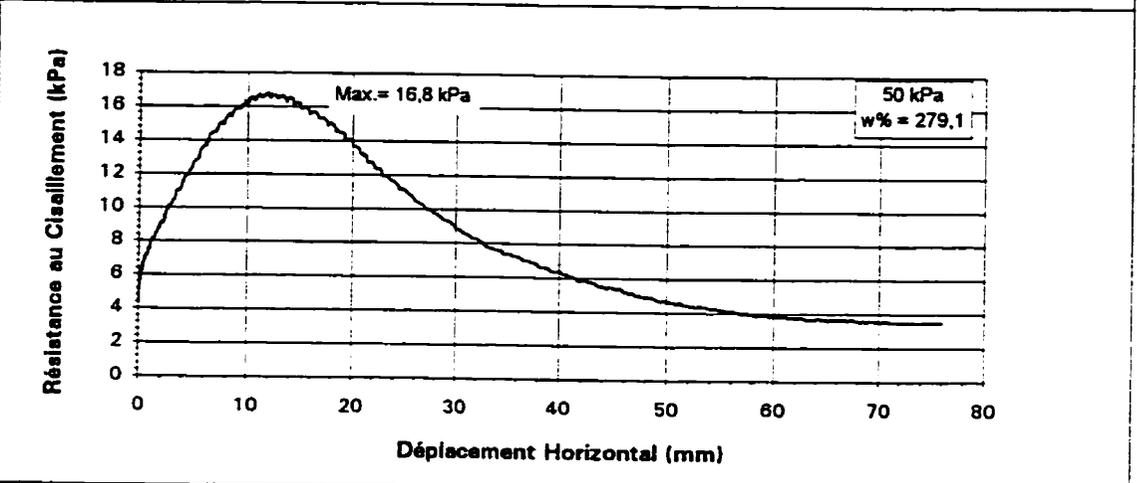
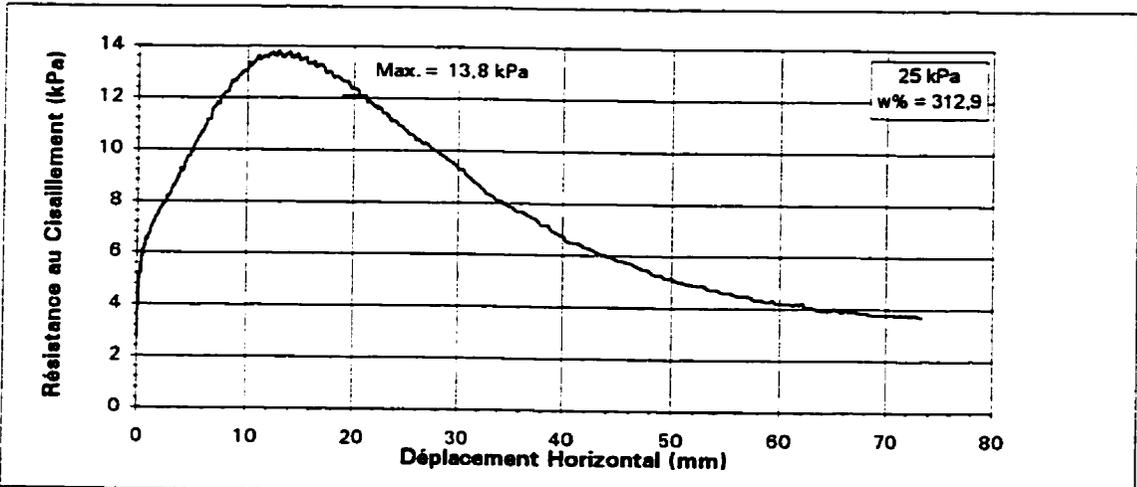
GCB no.: 4  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 heures (Submergés durant cisaillement)



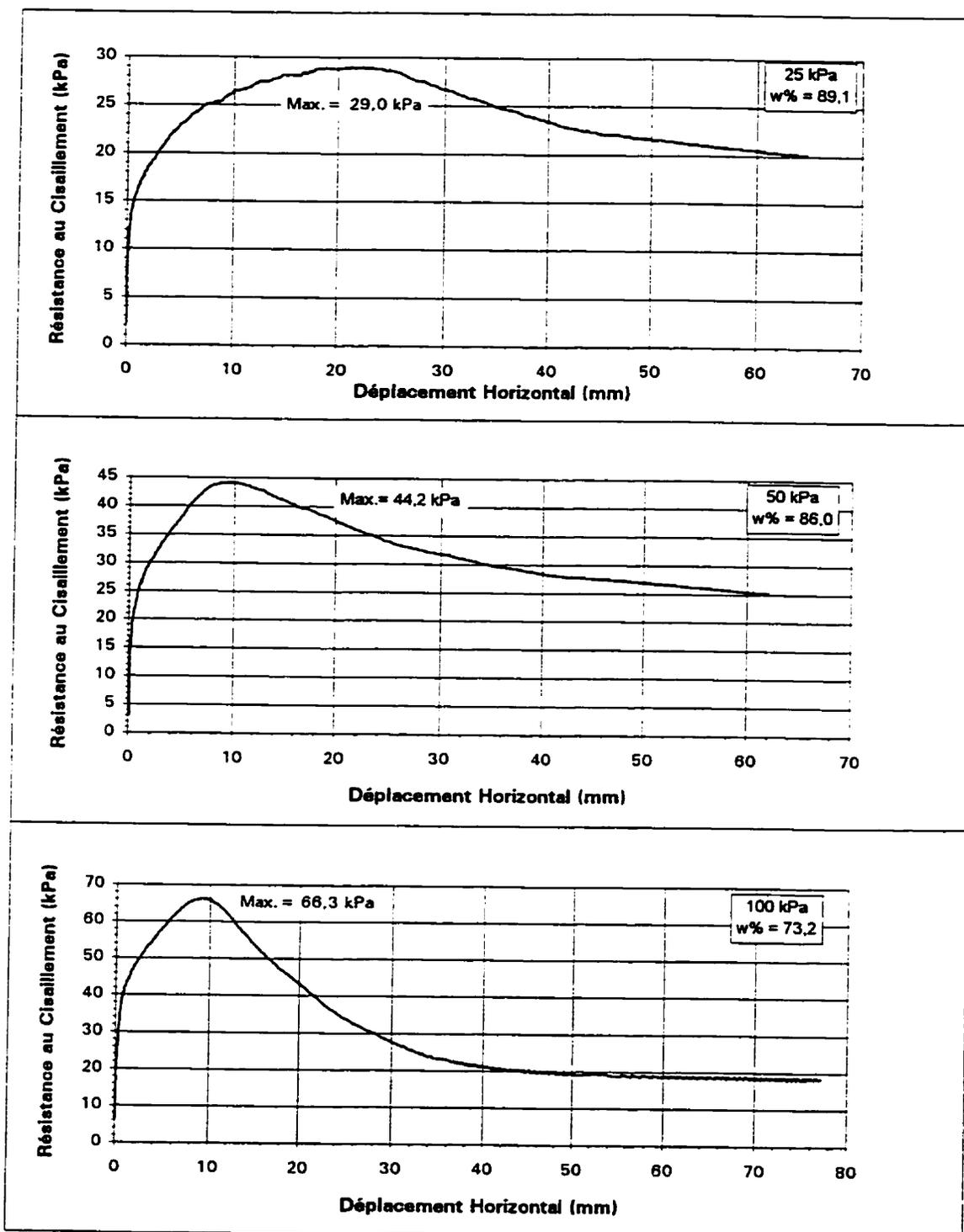
GCB no.: 4  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



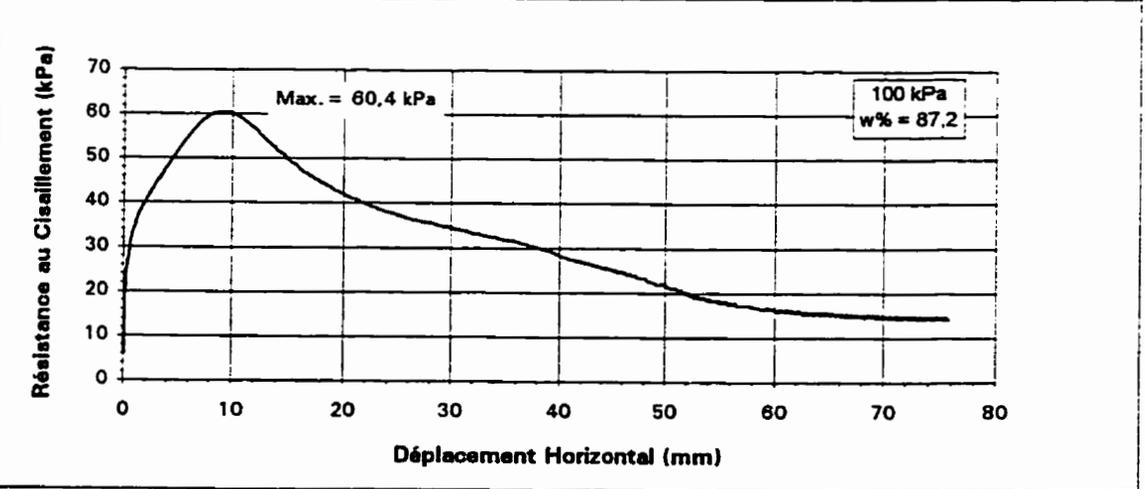
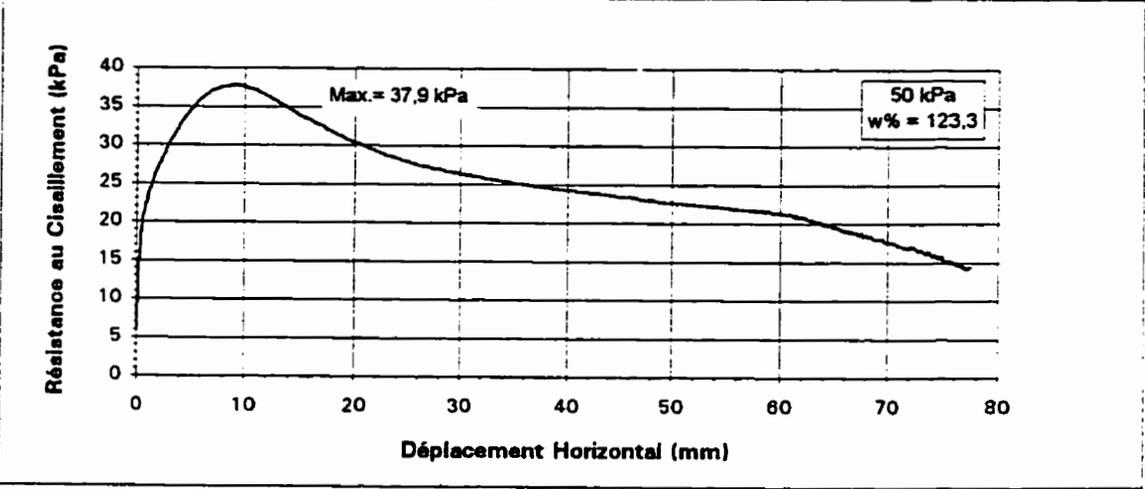
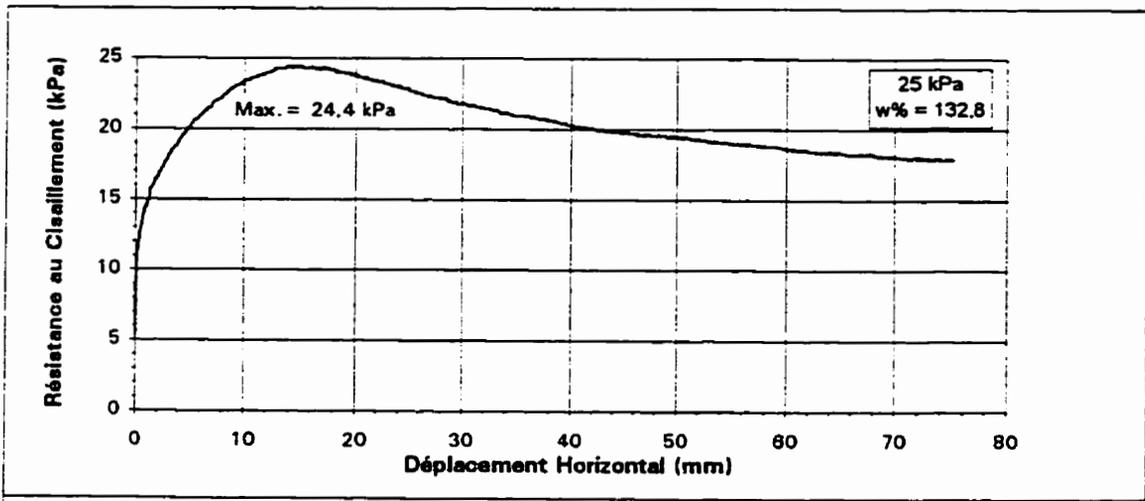
GCB no.: 4  
 Vitesse: 1 mm/min  
 Hydratation: 14 jours et + (hydratés sans contrainte)



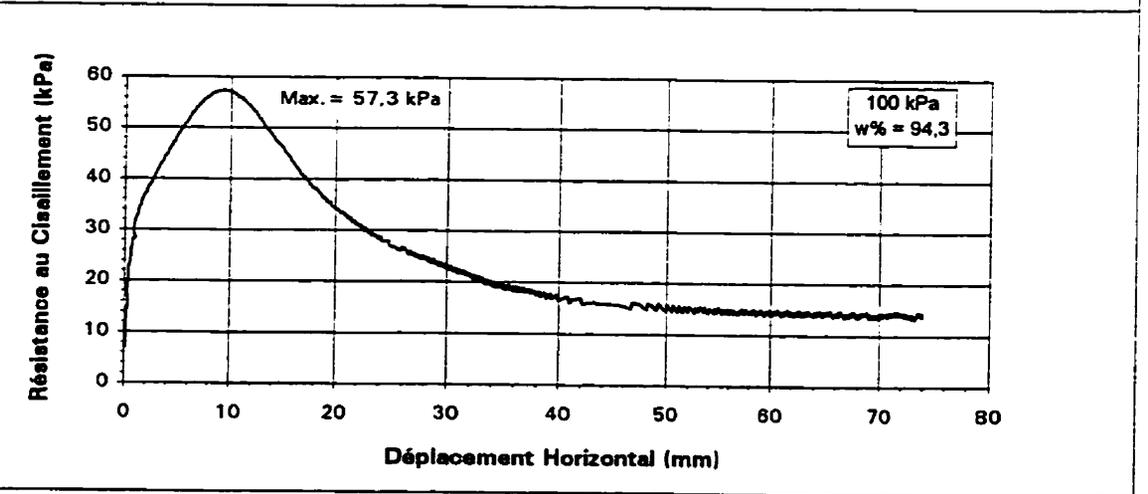
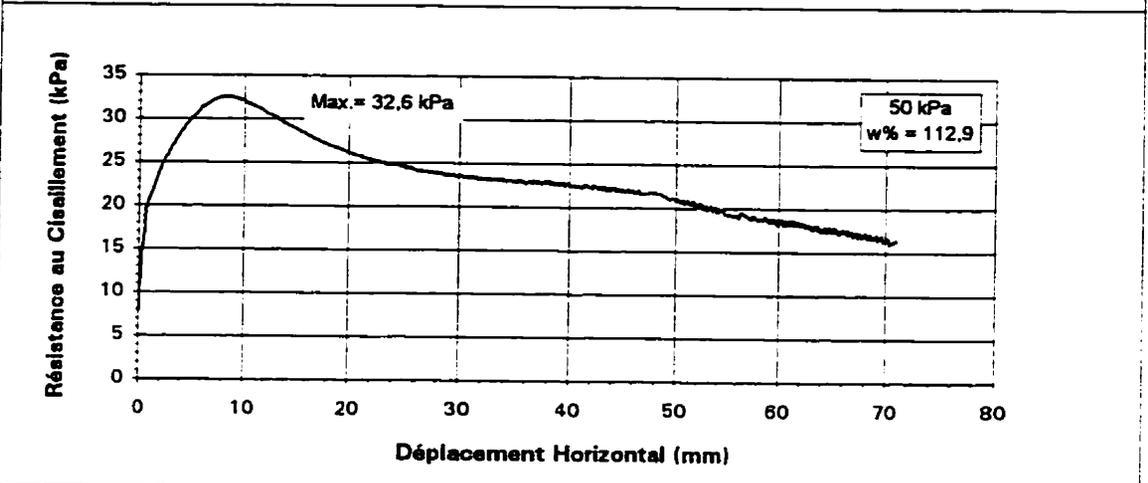
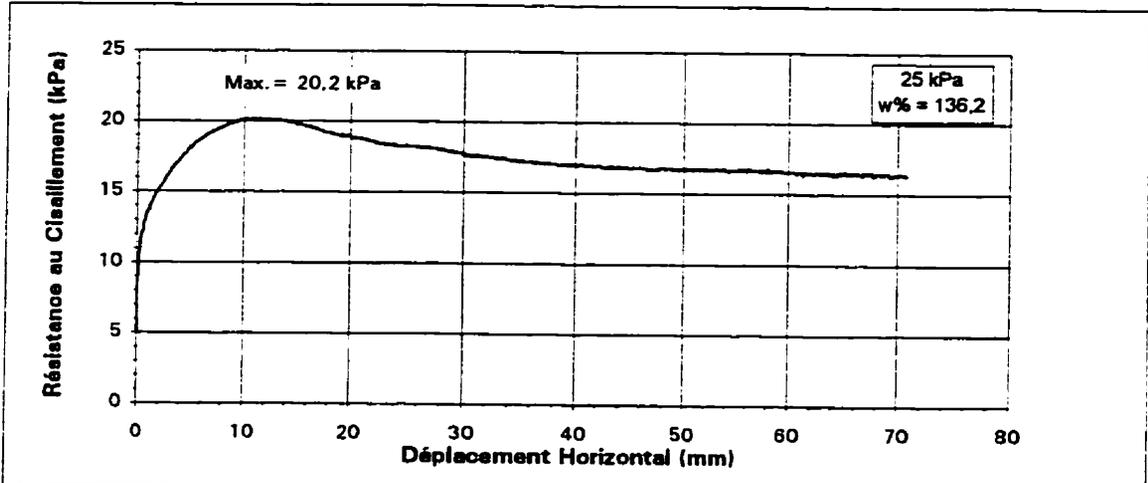
GCB no.: 4  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



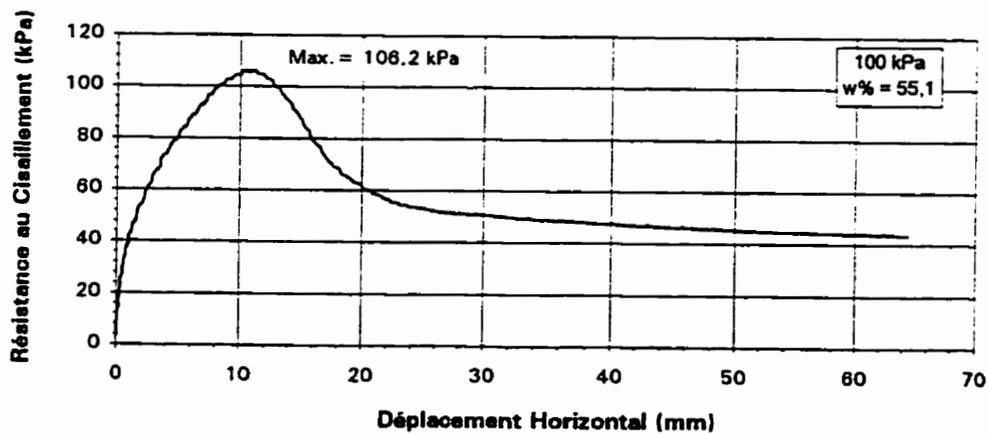
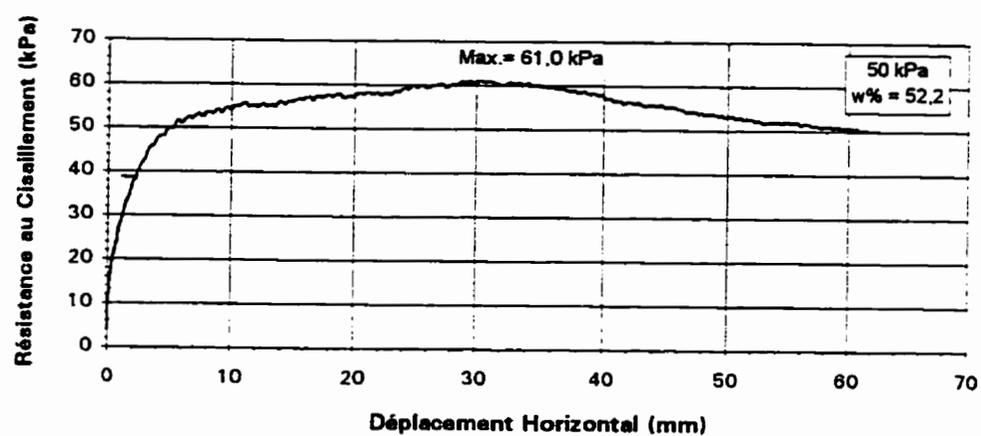
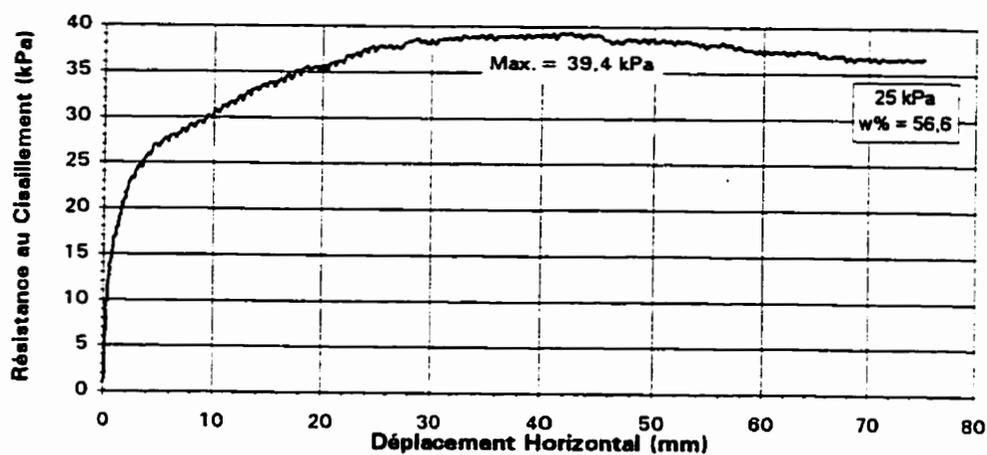
**GCB no.:** 4  
**Vitesse:** 0,1 mm/min  
**Hydratation:** 14 jours et +



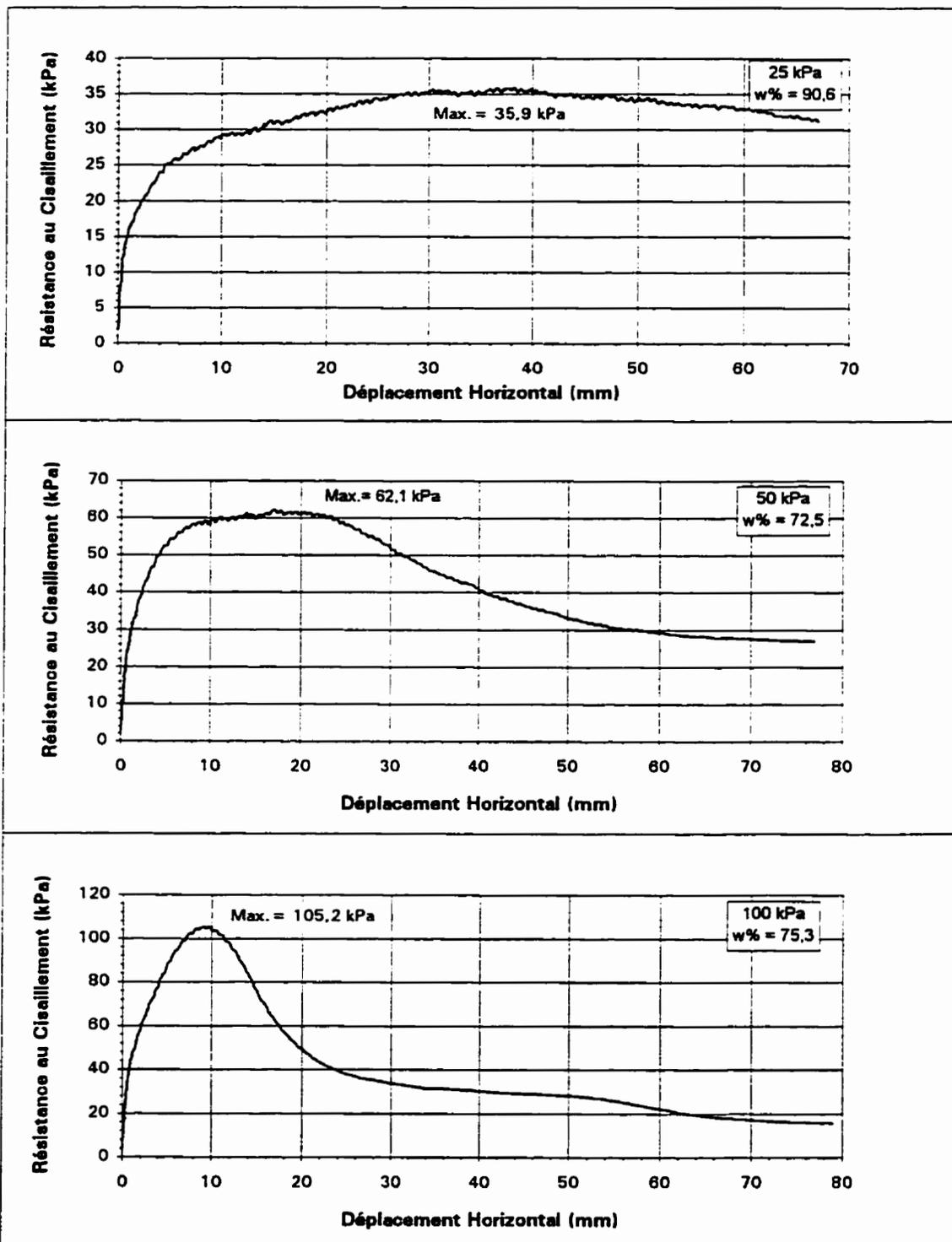
GCB no.: 4  
 Vitesse: 0,01 mm/min  
 Hydratation: 14 jours et +



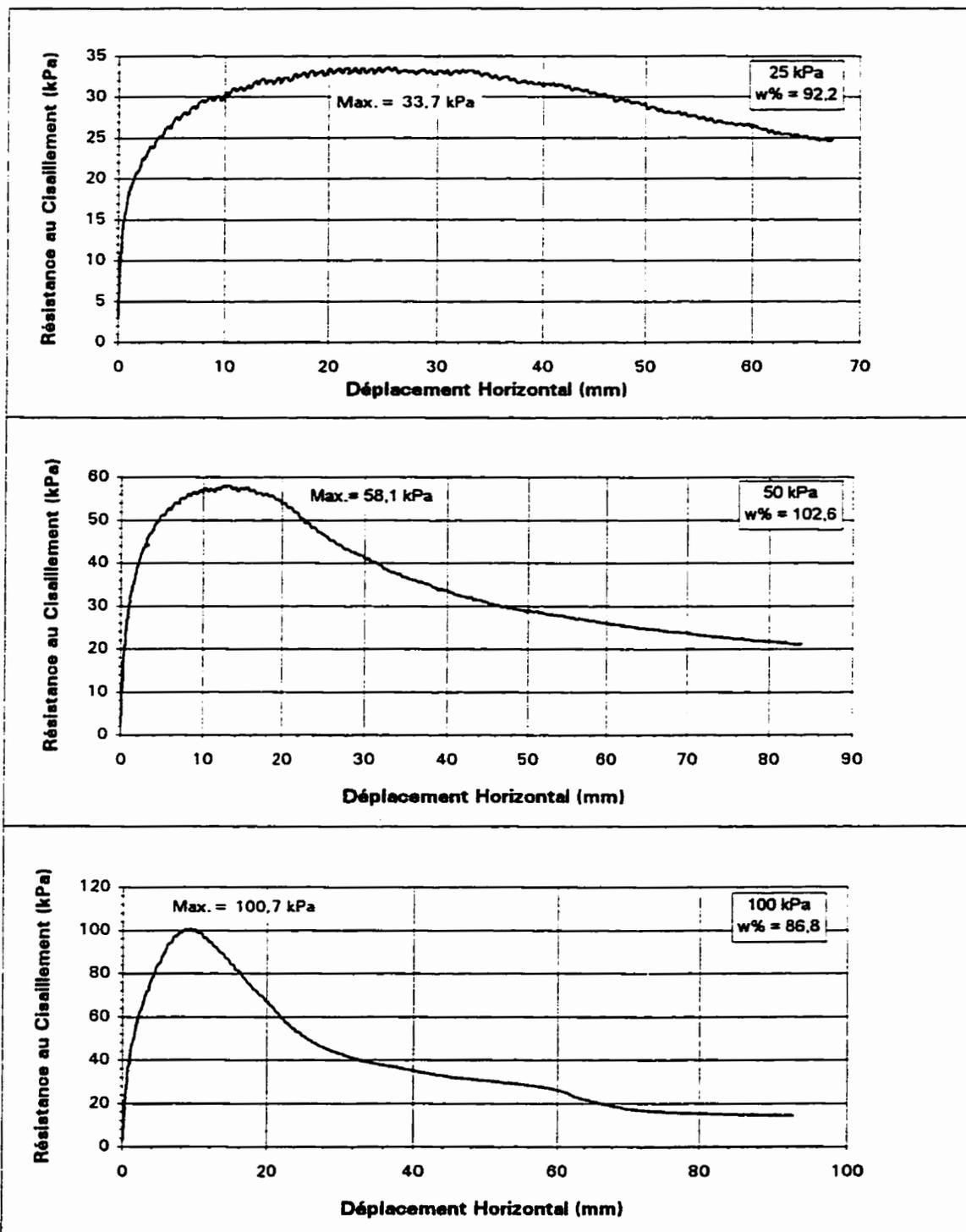
GCB no.: 5  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 2 heures



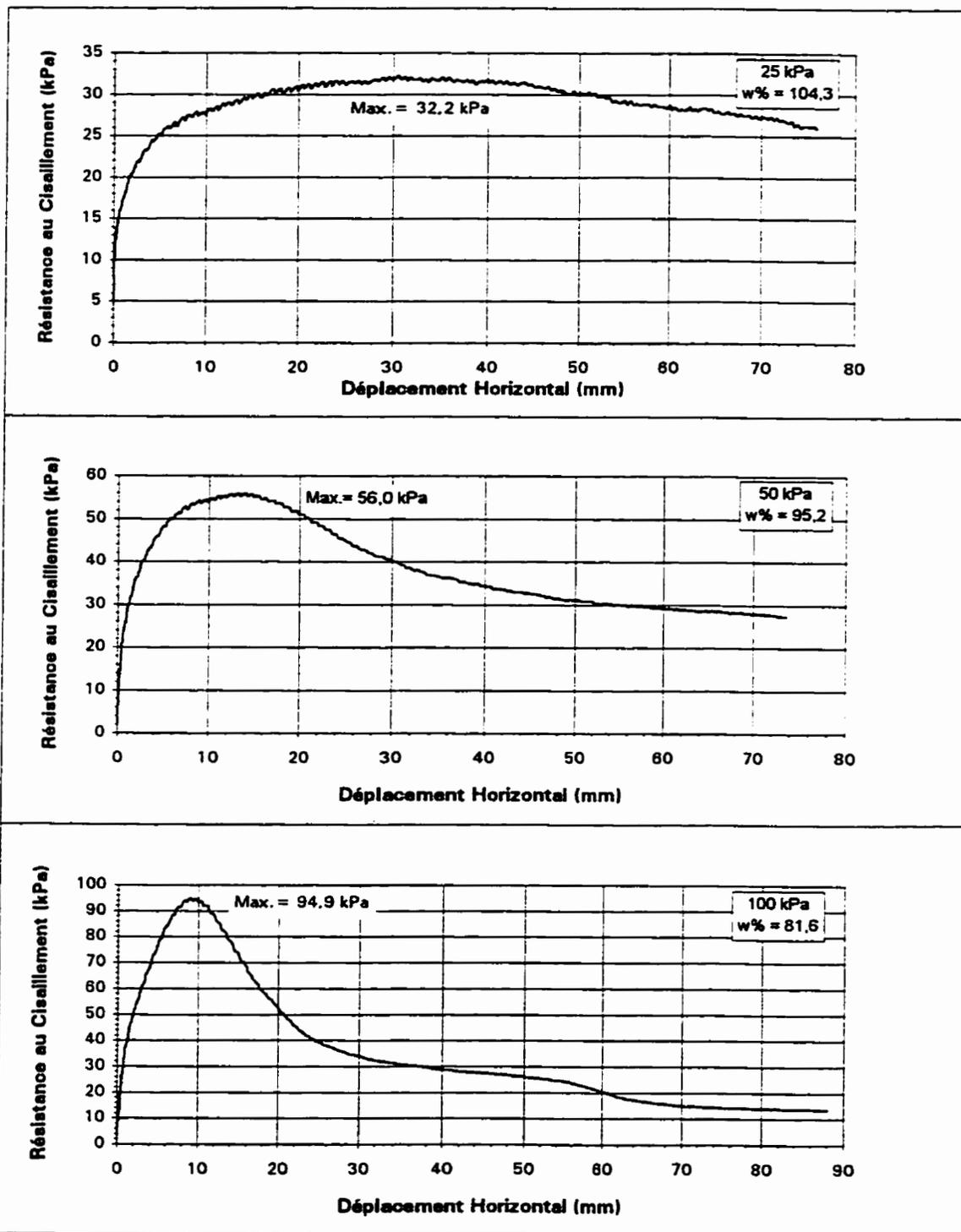
GCB no.: 5  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



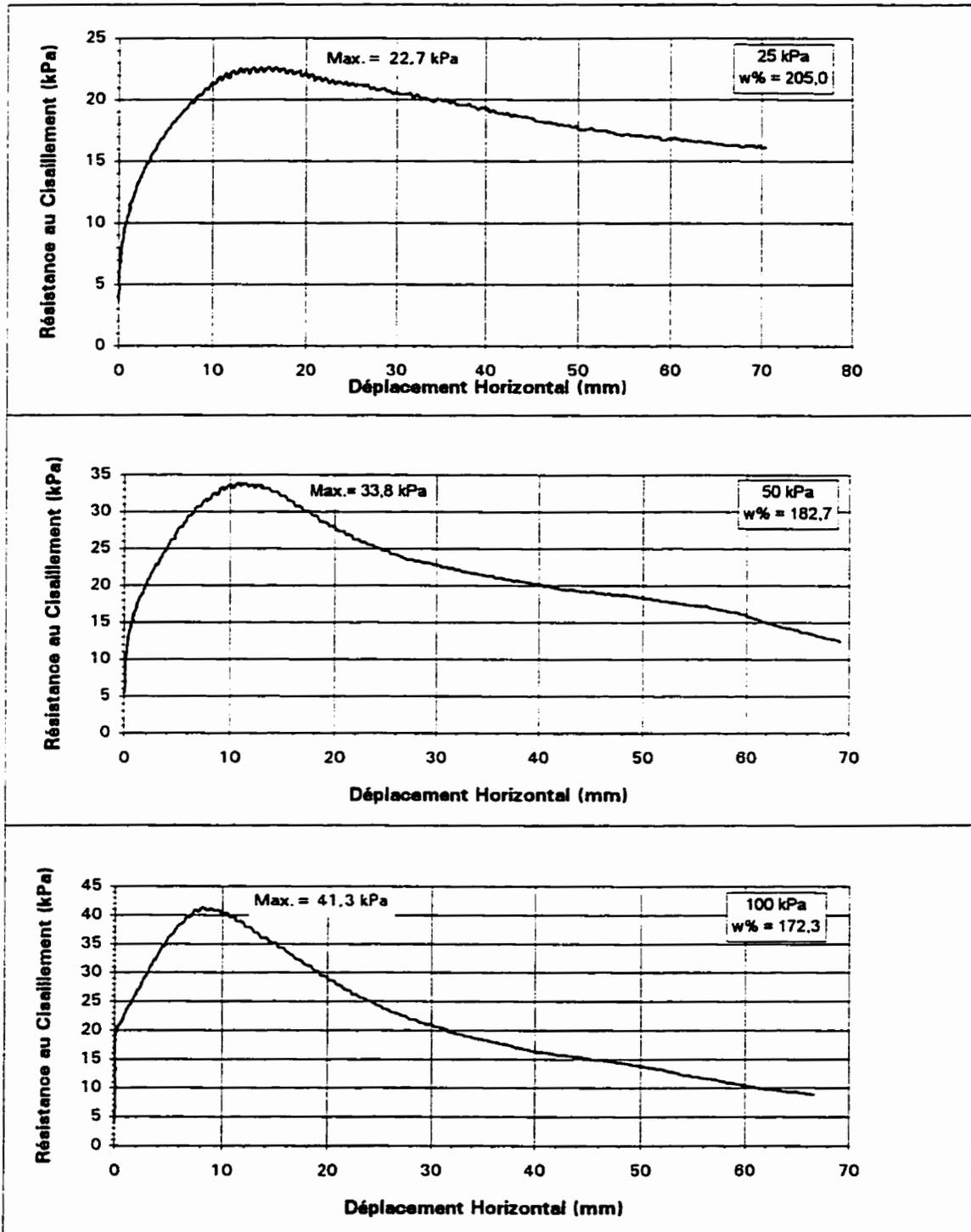
**GCB no.:** 5  
**Vitesse:** 1 mm/min  
**Hydratation:** 14 heures (Submergés durant cisaillement)



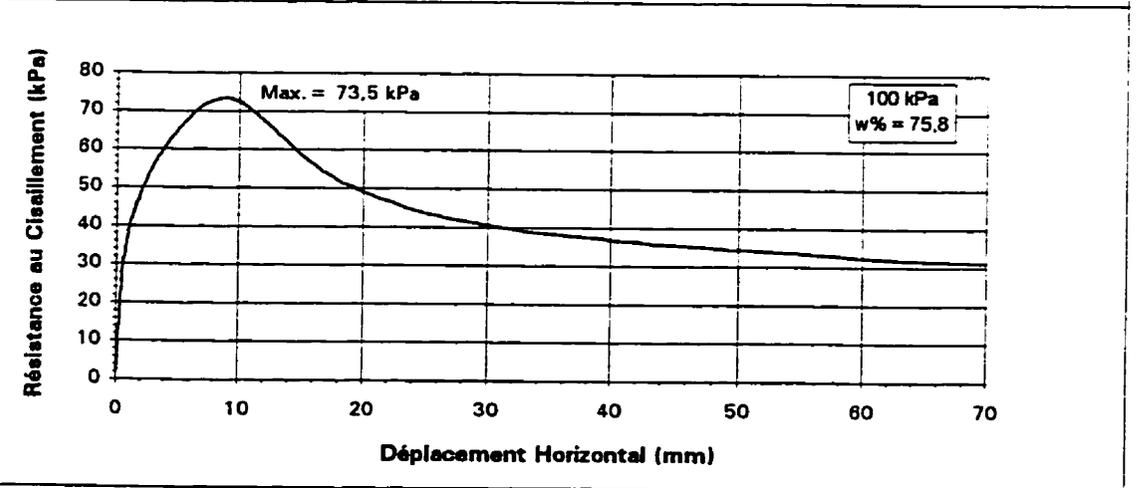
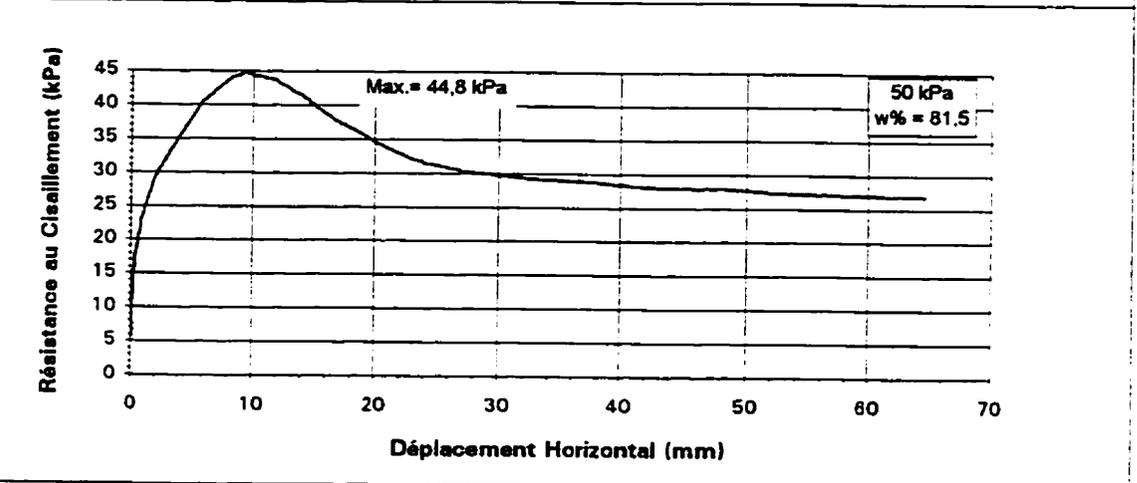
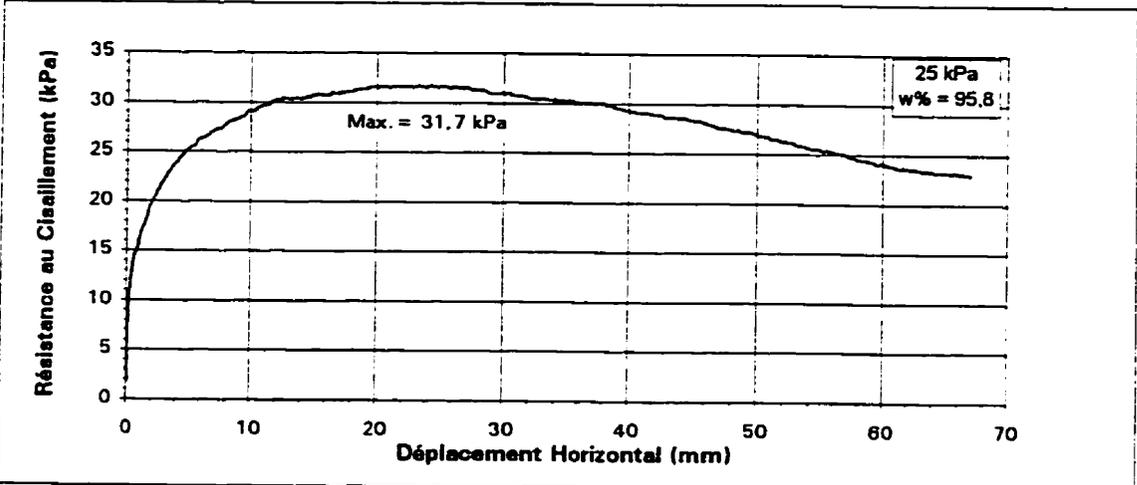
GCB no.: 5  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



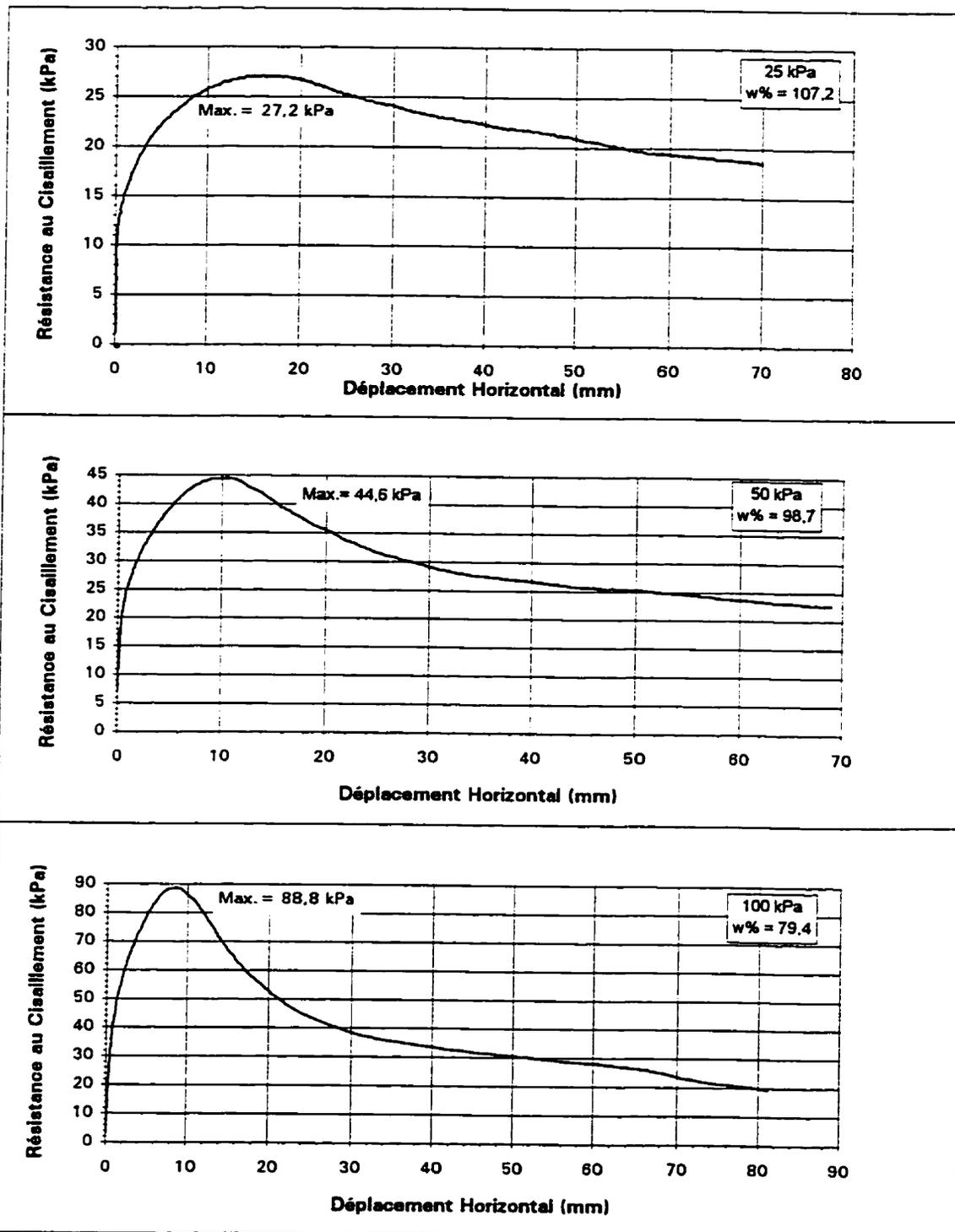
**GCB no.:** 5  
**Vitesse:** 1 mm/min  
**Hydratation:** 14 jours et + (hydratés sans contrainte)



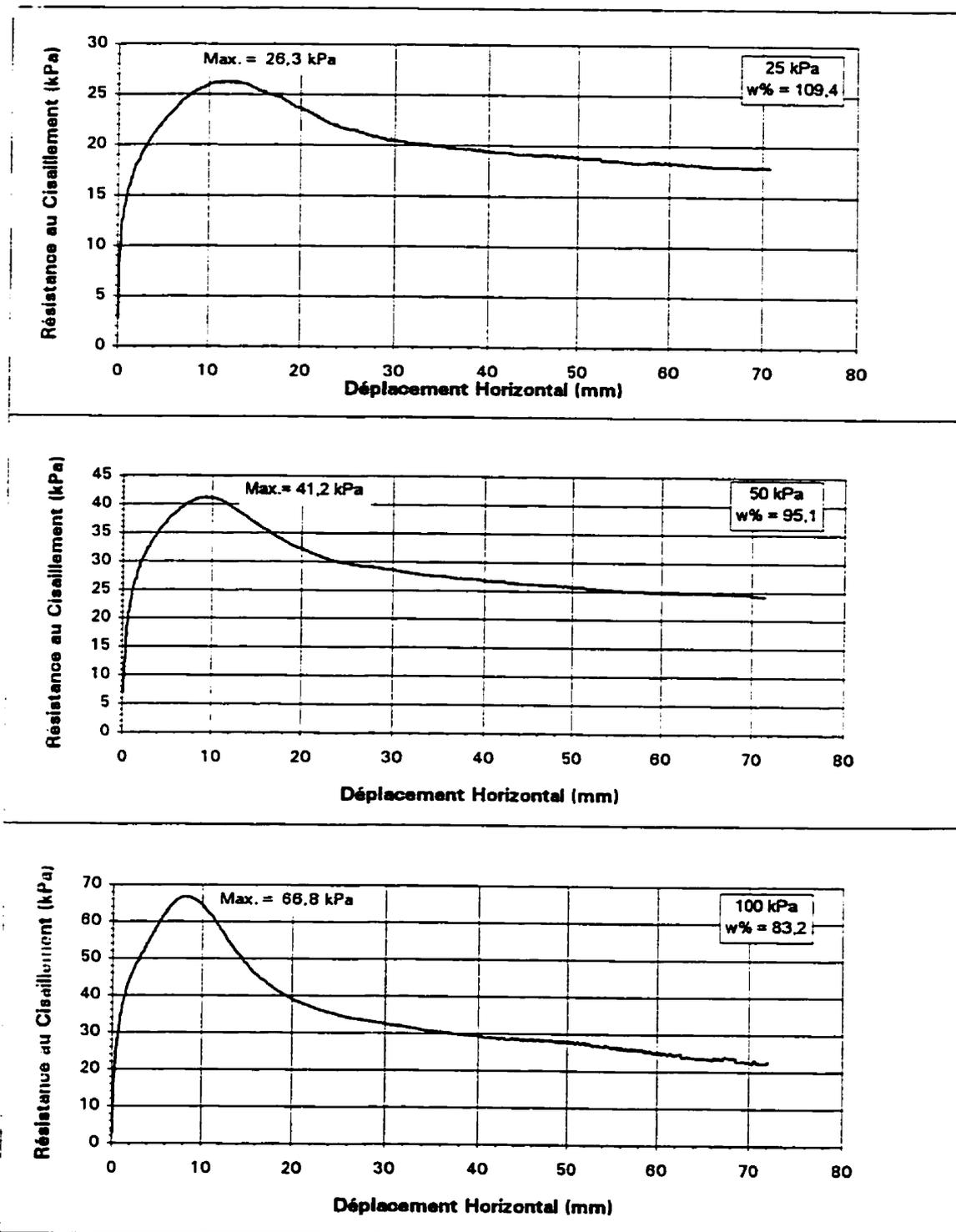
GCB no.: 5  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



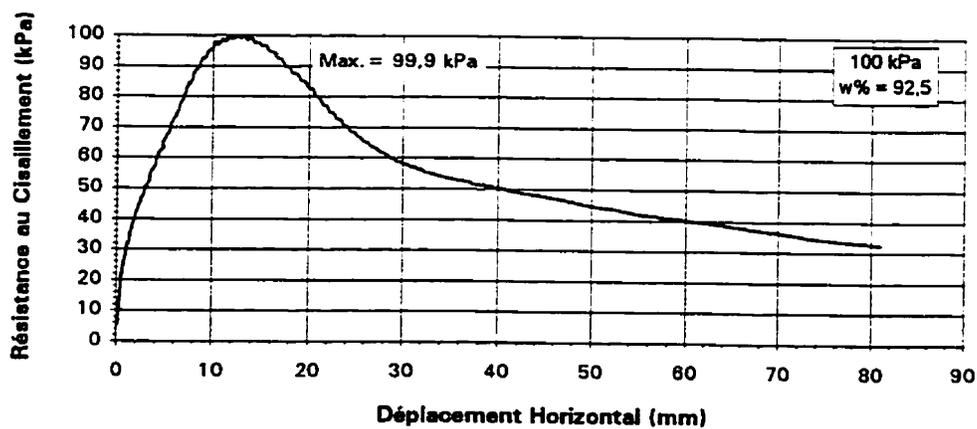
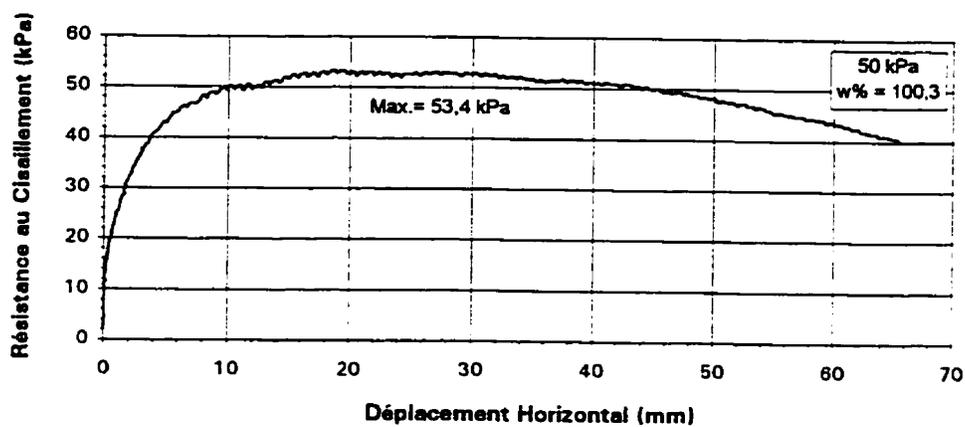
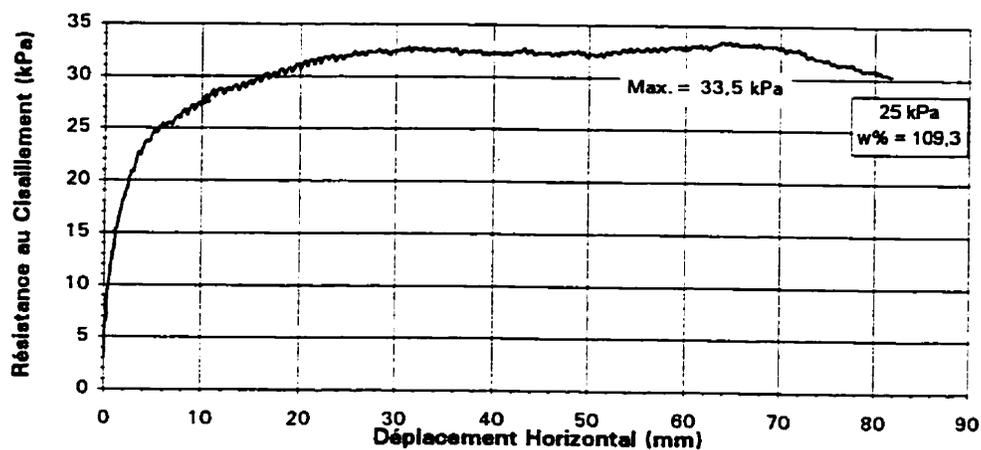
GCB no.: 5  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



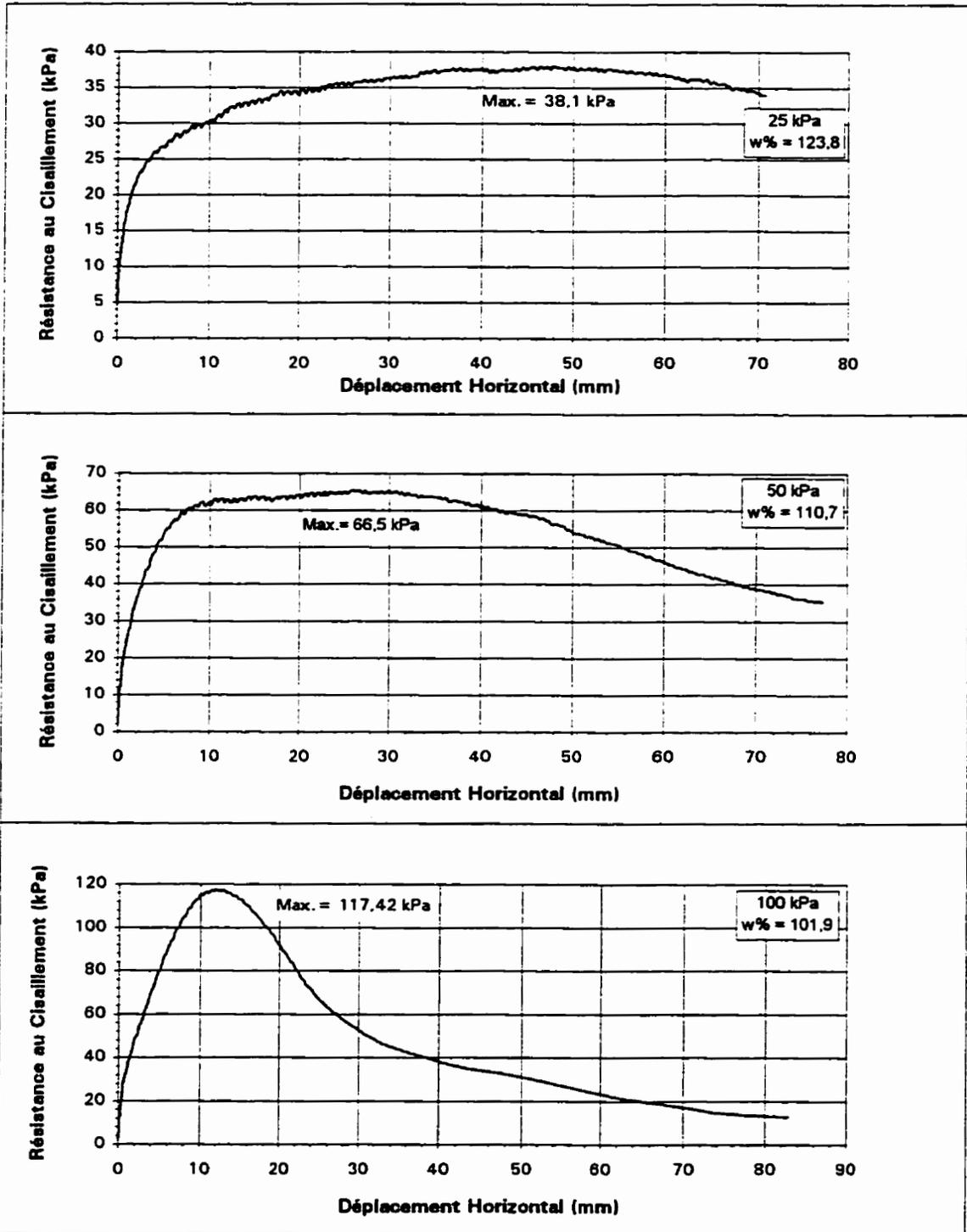
GCB no.: 5  
Vitesse: 0,01 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



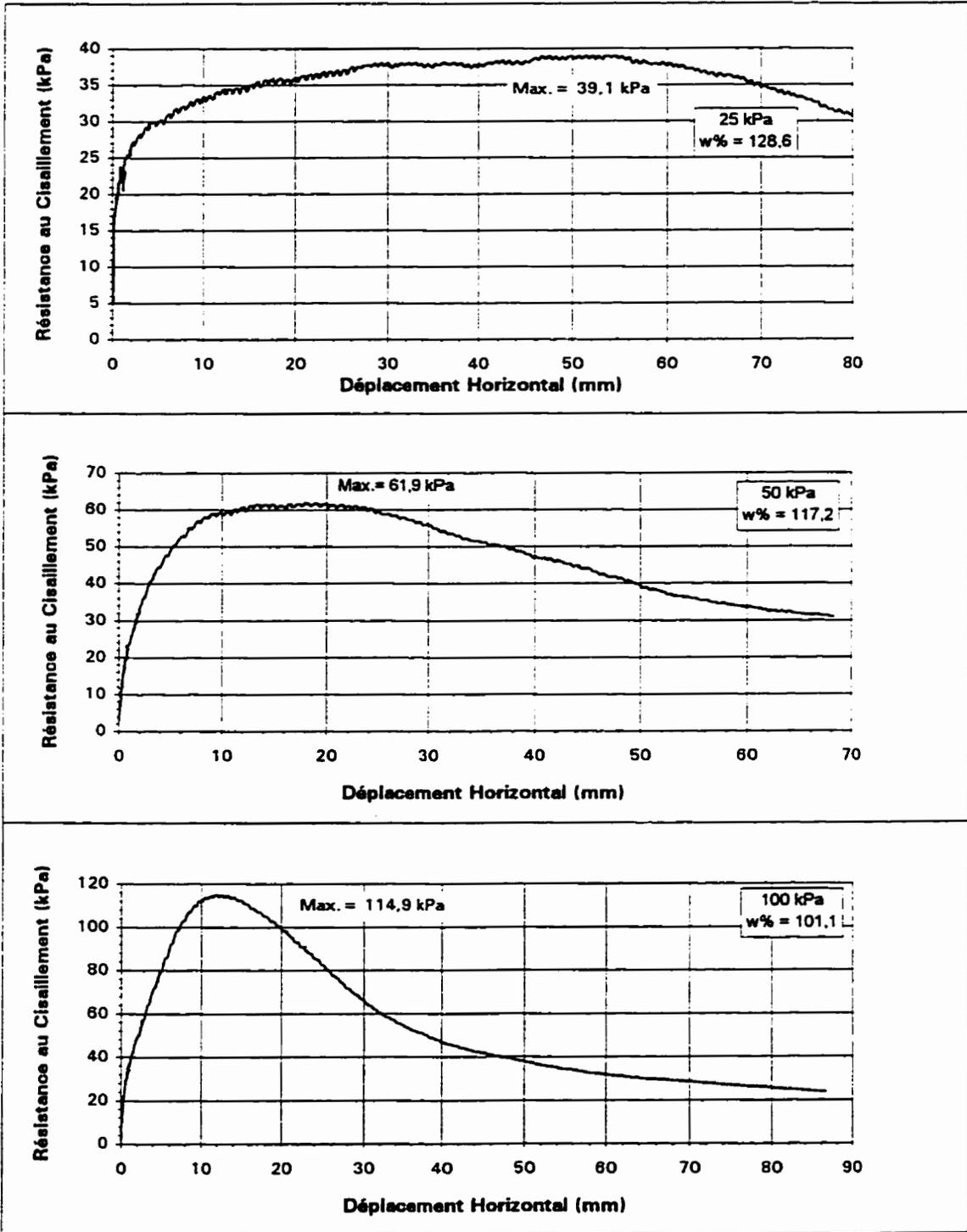
GCB no.: 6  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 2 heures



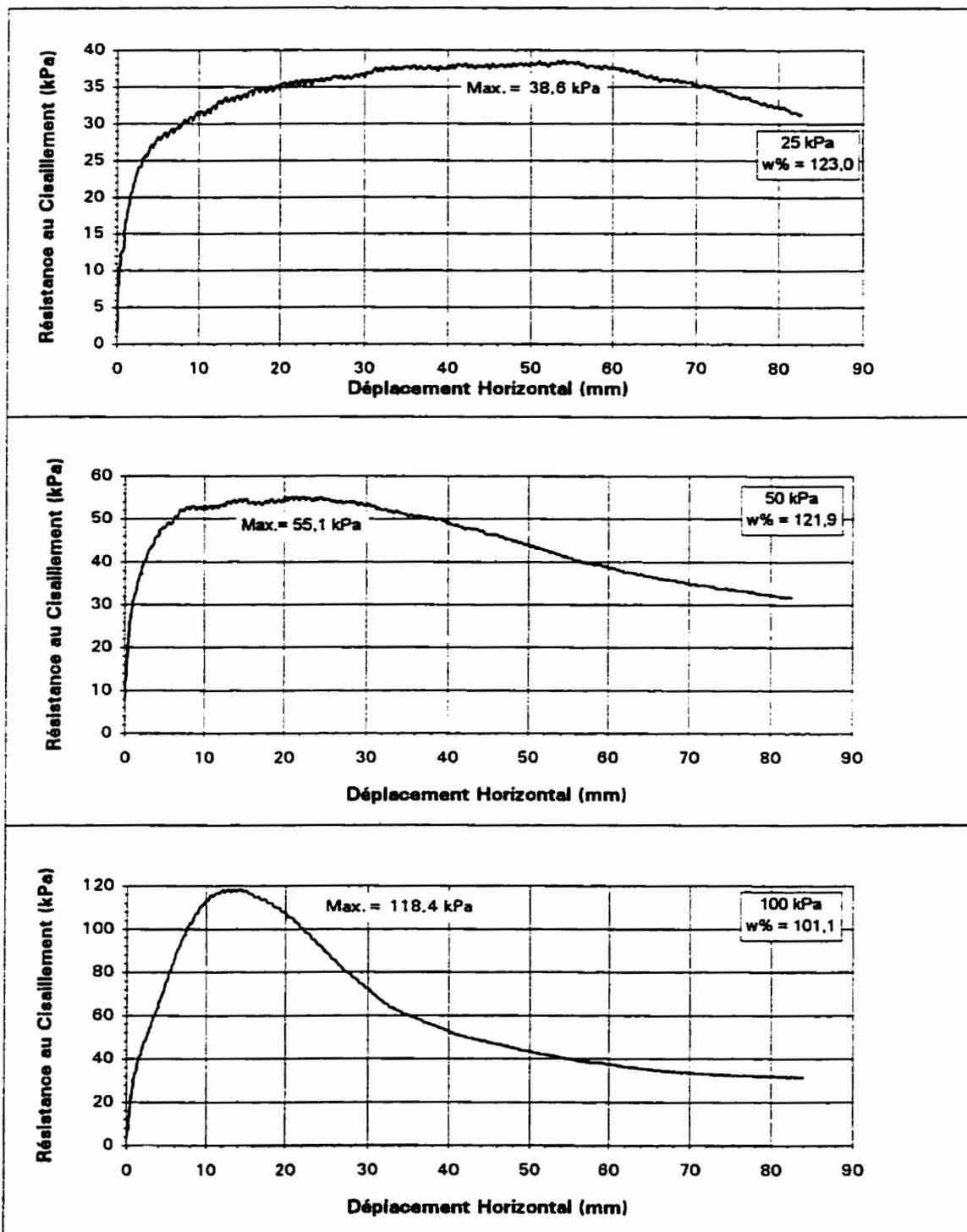
GCB no.: 6  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



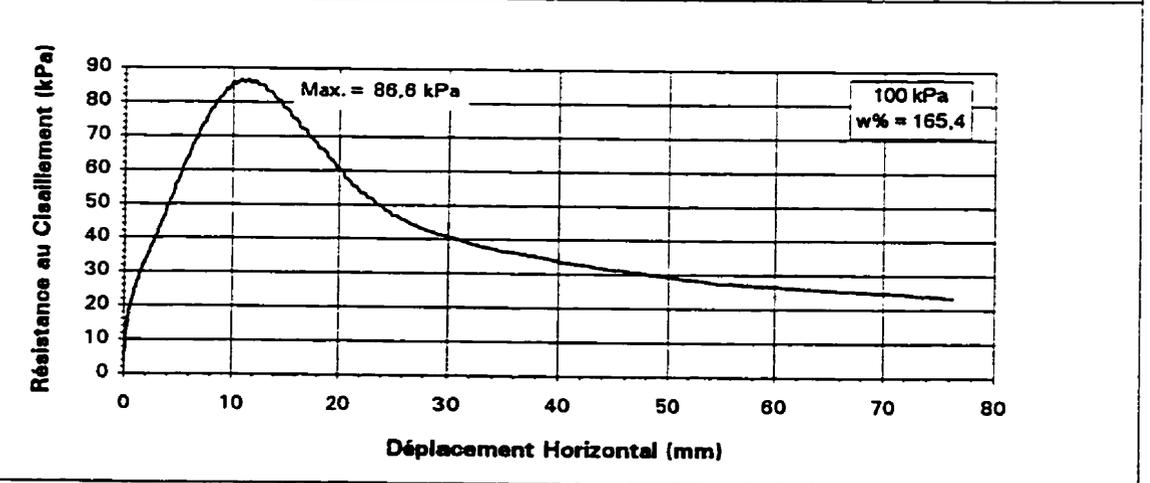
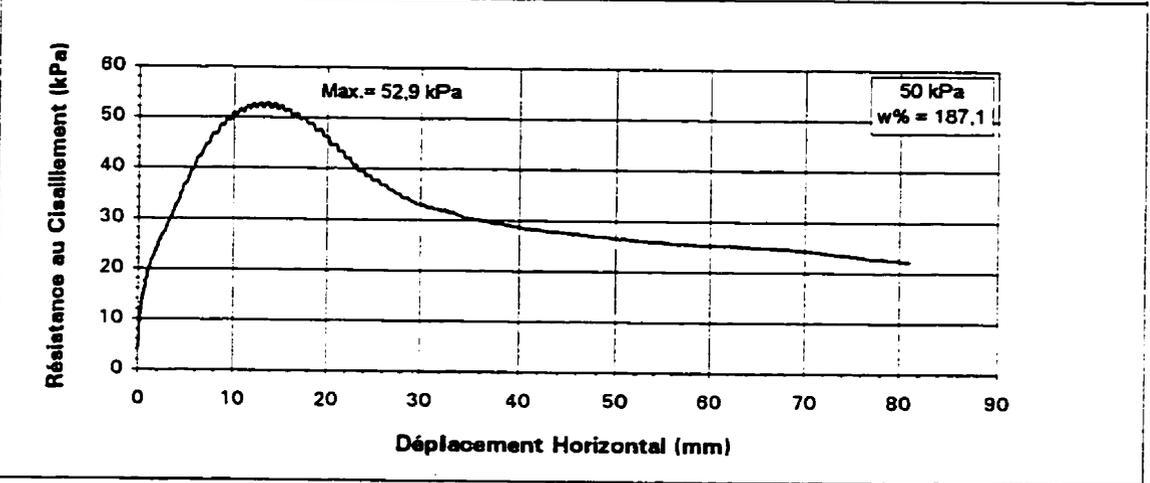
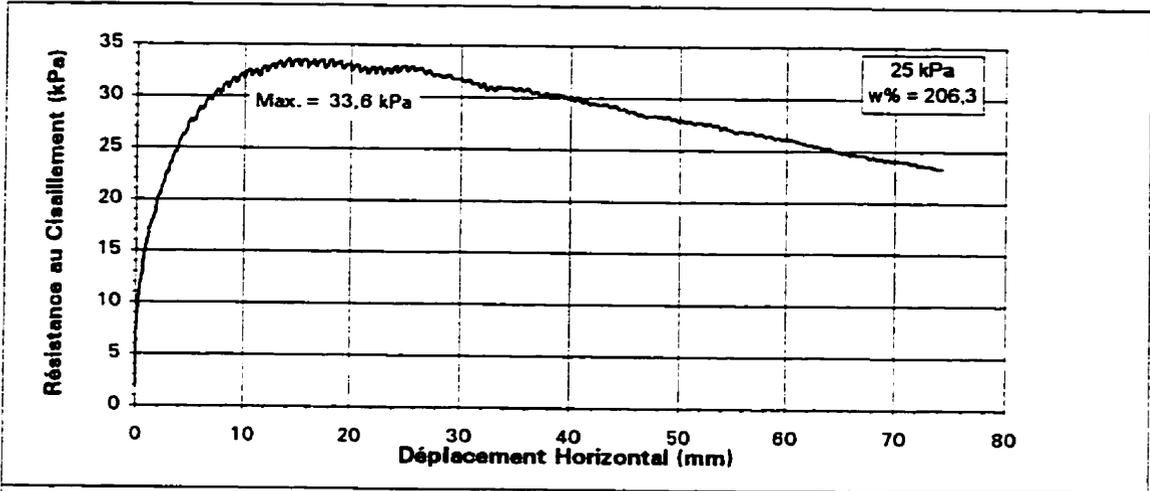
GCB no.: 6  
 Vitesse: 1 mm/min  
 Hydratation: 14 heures (Submergés durant cisaillement)



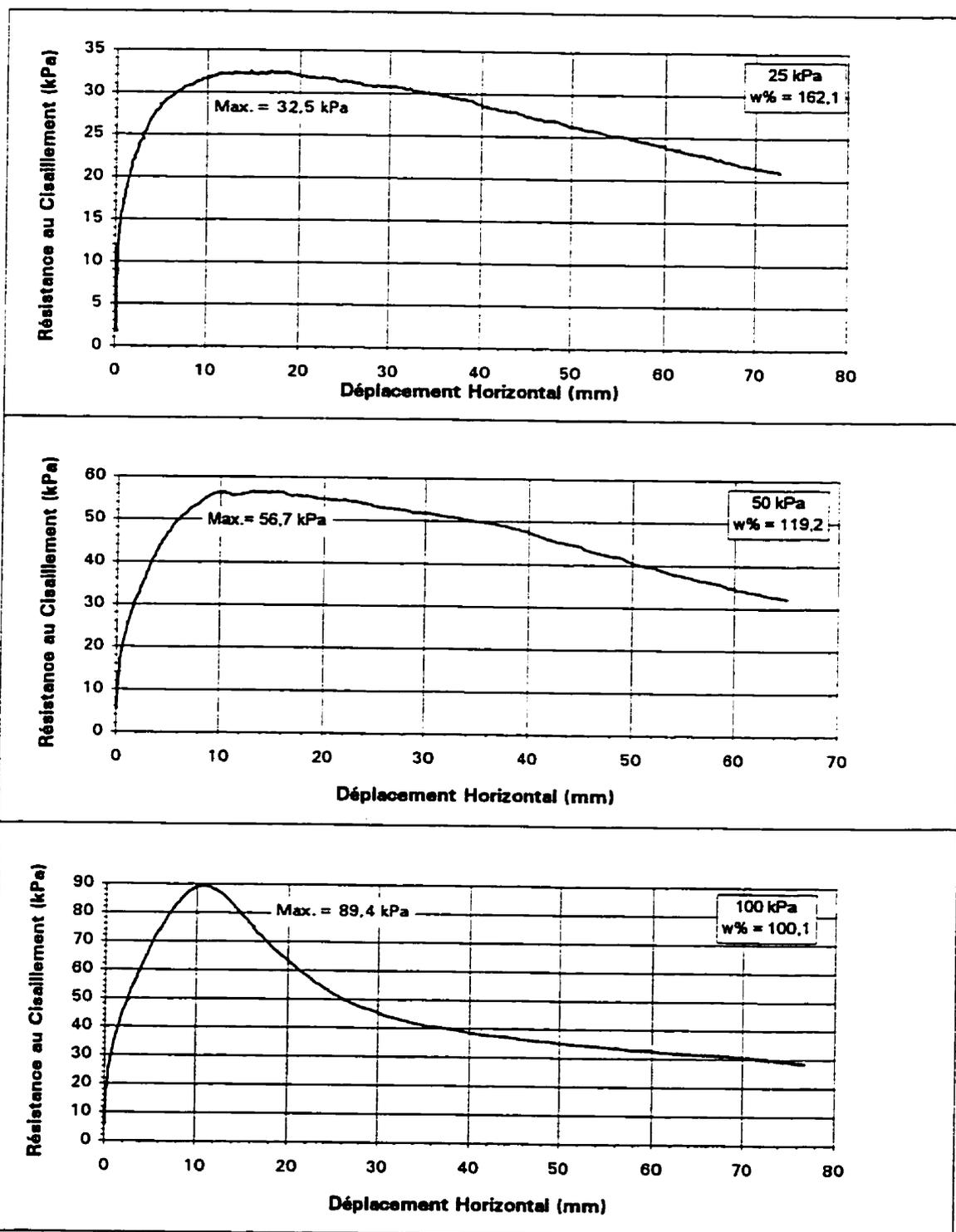
GCB no.: 6  
Vitesse: 1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



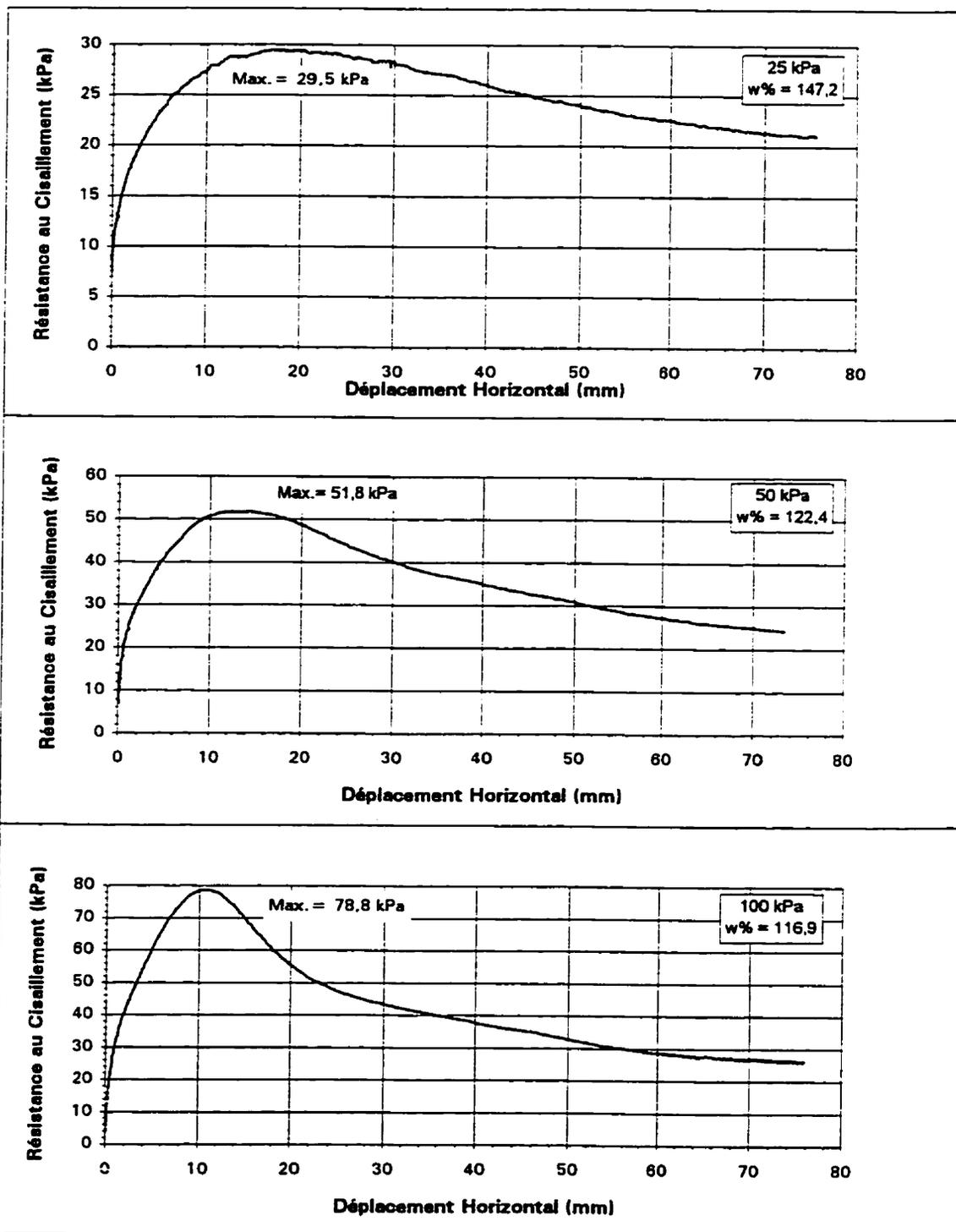
GCB no.: 6  
 Vitesse: 1 mm/min  
 Hydratation: 14 jours et + (hydratés sans contrainte)



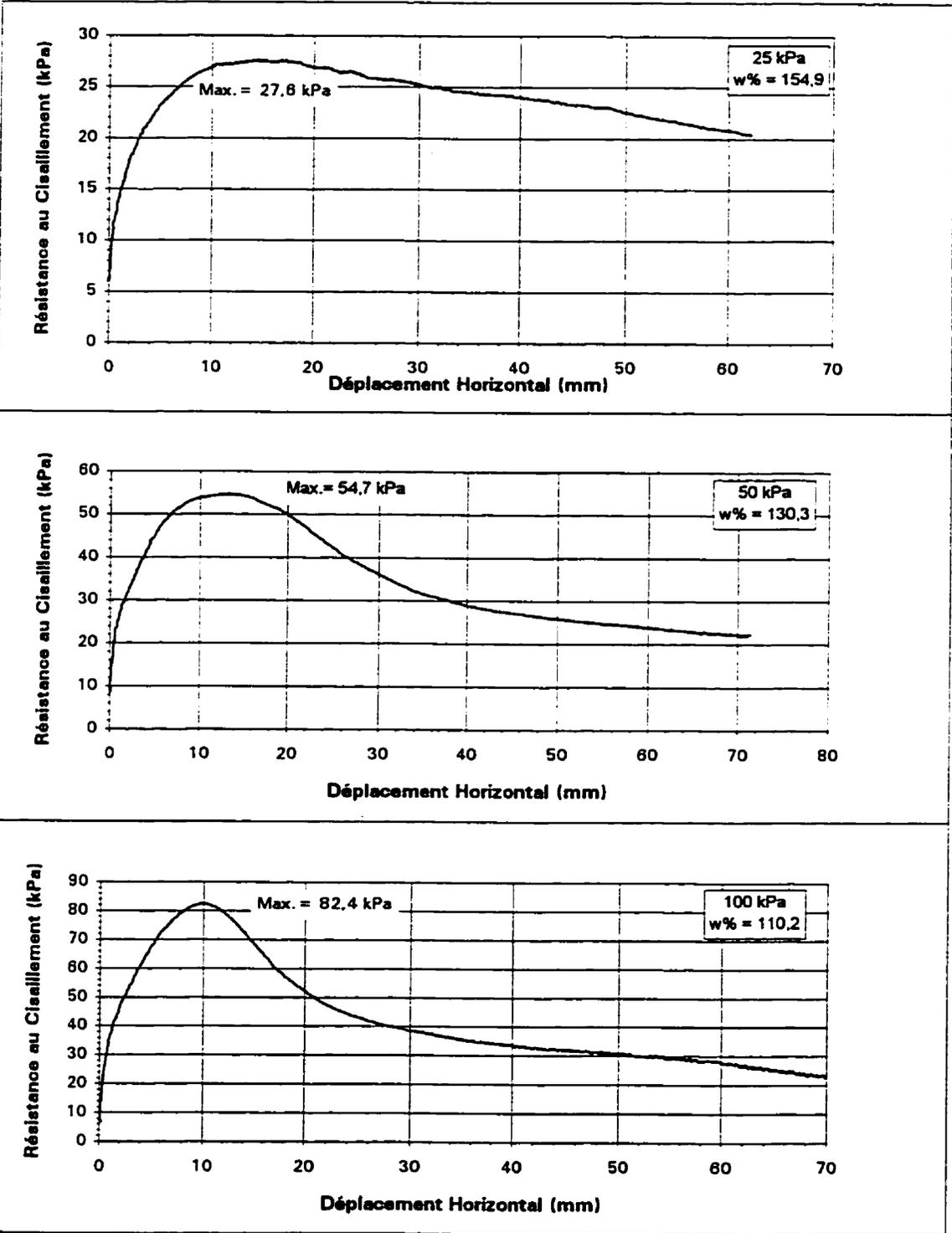
GCB no.: 6  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 heures



GCB no.: 6  
Vitesse: 0,1 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



GCB no.: 6  
Vitesse: 0,01 mm/min  
Hydratation: 14 jours et +



**ANNEXE II**

**SOMMAIRE DES RÉSULTATS DES ESSAIS DE RÉSISTANCE  
AU CISAILLEMENT DIRECT**

**ANNEXE II****Tableau A2.1 - Résultats des essais de cisaillement pour les GCB 1 et 2.**

| Vitesse<br>(mm/min)         | Hydratation<br>(durée) | Paramètres         | GCB 1  |        |         | GCB 2  |        |         |
|-----------------------------|------------------------|--------------------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
|                             |                        |                    | 25 kPa | 50 kPa | 100 kPa | 25 kPa | 50 kPa | 100 kPa |
| 1                           | Sec                    | $\tau_{max}$ (kPa) | 58,3   | 86,6   | 157,4   | 43,2   | 59,1   | 109,9   |
|                             |                        | w%                 | 6,5    | 7,1    | 6,6     | 6,4    | 7,0    | 7,6     |
|                             |                        | Durée              | 0,0 H  | 0,0 H  | 0,0 H   | 0,0 H  | 0,0 H  | 0,0 H   |
|                             | 2 H                    | $\tau_{max}$ (kPa) |        |        |         |        |        |         |
|                             |                        | w%                 |        |        |         |        |        |         |
|                             |                        | Durée              |        |        |         |        |        |         |
|                             | 14 H                   | $\tau_{max}$ (kPa) | 36,5   | 50,1   | 73,8    | 37,9   | 55,1   | 103,2   |
|                             |                        | w%                 | 115,0  | 102,5  | 85,0    | 78,5   | 74,7   | 64,6    |
| Durée                       |                        | 14,3 H             | 13,8 H | 13,6 H | 13,9 H  | 13,8 H | 13,9 H |         |
| 14 H<br>submergé            | $\tau_{max}$ (kPa)     |                    |        |        |         |        |        |         |
|                             | w%                     |                    |        |        |         |        |        |         |
|                             | Durée                  |                    |        |        |         |        |        |         |
| 48 H                        | $\tau_{max}$ (kPa)     | 35,8               | 56,5   | 69,2   | 34,3    | 49,0   | 84,1   |         |
|                             | w%                     | 132,0              | 117,0  | 85,7   | 125,2   | 102,8  | 73,7   |         |
|                             | Durée                  | 53,2 H             | 45,5 H | 49,6 H | 45,8 H  | 47,7 H | 44,6 H |         |
| >14 J                       | $\tau_{max}$ (kPa)     | 33,9               | 43,5   | 70,3   | 33,2    | 47,4   | 86,0   |         |
|                             | w%                     | 138,9              | 137,0  | 92,7   | 148,3   | 105,9  | 81,8   |         |
|                             | Durée                  | 14,6 J             | 14,9 J | 24,6 J | 41,7 J  | 43,8 J | 29,7 J |         |
| >14 J<br>sans<br>contrainte | $\tau_{max}$ (kPa)     |                    |        |        |         |        |        |         |
|                             | w%                     |                    |        |        |         |        |        |         |
|                             | Durée                  |                    |        |        |         |        |        |         |
| 0,1                         | 14 H                   | $\tau_{max}$ (kPa) | 31,5   | 56,4   | 70,4    | 29,8   | 58,1   | 88,1    |
|                             |                        | w%                 | 104,9  | 92,6   | 81,4    | 97,9   | 68,9   | 62,7    |
|                             |                        | Durée              | 13,7 H | 13,1 H | 14,1 H  | 13,3 H | 13,9 H | 13,7 H  |
|                             | >14 J                  | $\tau_{max}$ (kPa) | 20,5   | 34,2   | 47,8    | 27,2   | 44,7   | 77,8    |
| w%                          |                        | 154,2              | 142,6  | 124,5  | 157,7   | 128,1  | 107,2  |         |
| Durée                       |                        | 14,5 J             | 33,9 J | 33,0 J | 15,0 J  | 21,4 J | 34,9 J |         |
| 0,01                        | >14 J                  | $\tau_{max}$ (kPa) |        |        |         |        |        |         |
|                             |                        | w%                 |        |        |         |        |        |         |
|                             |                        | Durée              |        |        |         |        |        |         |

Tableau A2.2 - Résultats des essais de cisaillement pour les GCB 3 et 4.

| Vitesse<br>(mm/min)         | Hydratation<br>(durée) | Paramètres         | GCB 3  |        |         | GCB 4  |        |         |
|-----------------------------|------------------------|--------------------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|
|                             |                        |                    | 25 kPa | 50 kPa | 100 kPa | 25 kPa | 50 kPa | 100 kPa |
| 1                           | Sec                    | $\tau_{max}$ (kPa) | 53,8   | 75,6   | 132,2   |        |        |         |
|                             |                        | w%                 | 6,6    | 5,6    | 6,3     |        |        |         |
|                             |                        | Durée              | 0,0 H  | 0,0 H  | 0,0 H   |        |        |         |
|                             | 2 H                    | $\tau_{max}$ (kPa) |        |        |         | 35,7   | 42,3   | 92,1    |
|                             |                        | w%                 |        |        |         | 81,9   | 87,6   | 74,0    |
|                             |                        | Durée              |        |        |         | 3,5 H  | 2,5 H  | 3,0 H   |
|                             | 14 H                   | $\tau_{max}$ (kPa) | 42,9   | 66,6   | 105,1   | 38,7   | 47,8   | 79,5    |
|                             |                        | w%                 | 120,0  | 120,3  | 95,9    | 97,0   | 85,7   | 83,9    |
| Durée                       |                        | 14,1 H             | 13,7 H | 13,9 H | 14,2 H  | 14,2 H | 13,9 H |         |
| 14 H<br>submergé            | $\tau_{max}$ (kPa)     |                    |        |        | 32,2    | 56,1   | 92,3   |         |
|                             | w%                     |                    |        |        | 103,8   | 92,3   | 91,5   |         |
|                             | Durée                  |                    |        |        | 13,9 H  | 14,0 H | 14,0 H |         |
| 48 H                        | $\tau_{max}$ (kPa)     | 38,8               | 59,4   | 114,1  |         |        |        |         |
|                             | w%                     | 116,6              | 142,0  | 84,9   |         |        |        |         |
|                             | Durée                  | 50,3 H             | 45,5 H | 47,8 H |         |        |        |         |
| >14 J                       | $\tau_{max}$ (kPa)     | 39,7               | 62,4   | 115,0  | 31,6    | 45,8   | 72,1   |         |
|                             | w%                     | 141,9              | 121,1  | 95,0   | 130,1   | 109,2  | 85,2   |         |
|                             | Durée                  | 37,9 J             | 39,9 J | 30,0 J | 14,6 J  | 14,9 J | 18,9 J |         |
| >14 J<br>sans<br>contrainte | $\tau_{max}$ (kPa)     |                    |        |        | 13,8    | 16,8   | 21,3   |         |
|                             | w%                     |                    |        |        | 312,9   | 279,1  | 254,5  |         |
|                             | Durée                  |                    |        |        | 20,8 J  | 20,9 J | 20,9 J |         |
| 0,1                         | 14 H                   | $\tau_{max}$ (kPa) | 35,9   | 51,6   | 109,3   | 29,0   | 44,2   | 66,3    |
|                             |                        | w%                 | 106,2  | 107,5  | 99,4    | 89,1   | 86,0   | 73,2    |
|                             |                        | Durée              | 13,7 H | 13,3 H | 13,8 H  | 14,0 H | 14,4 H | 14,4 H  |
| >14 J                       | $\tau_{max}$ (kPa)     |                    |        | 83,0   | 24,4    | 37,9   | 60,4   |         |
|                             | w%                     |                    |        | 124,9  | 132,8   | 123,3  | 87,2   |         |
|                             | Durée                  |                    |        | 36,9 J | 16,7 J  | 14,7 J | 14,0 J |         |
| 0,01                        | >14 J                  | $\tau_{max}$ (kPa) |        |        | 101,9   | 20,2   | 32,6   | 57,3    |
|                             |                        | w%                 |        |        | 108,3   | 136,2  | 112,9  | 94,3    |
|                             |                        | Durée              |        |        | 18,0 J  | 14,5 J | 16,8 J | 17,8 J  |

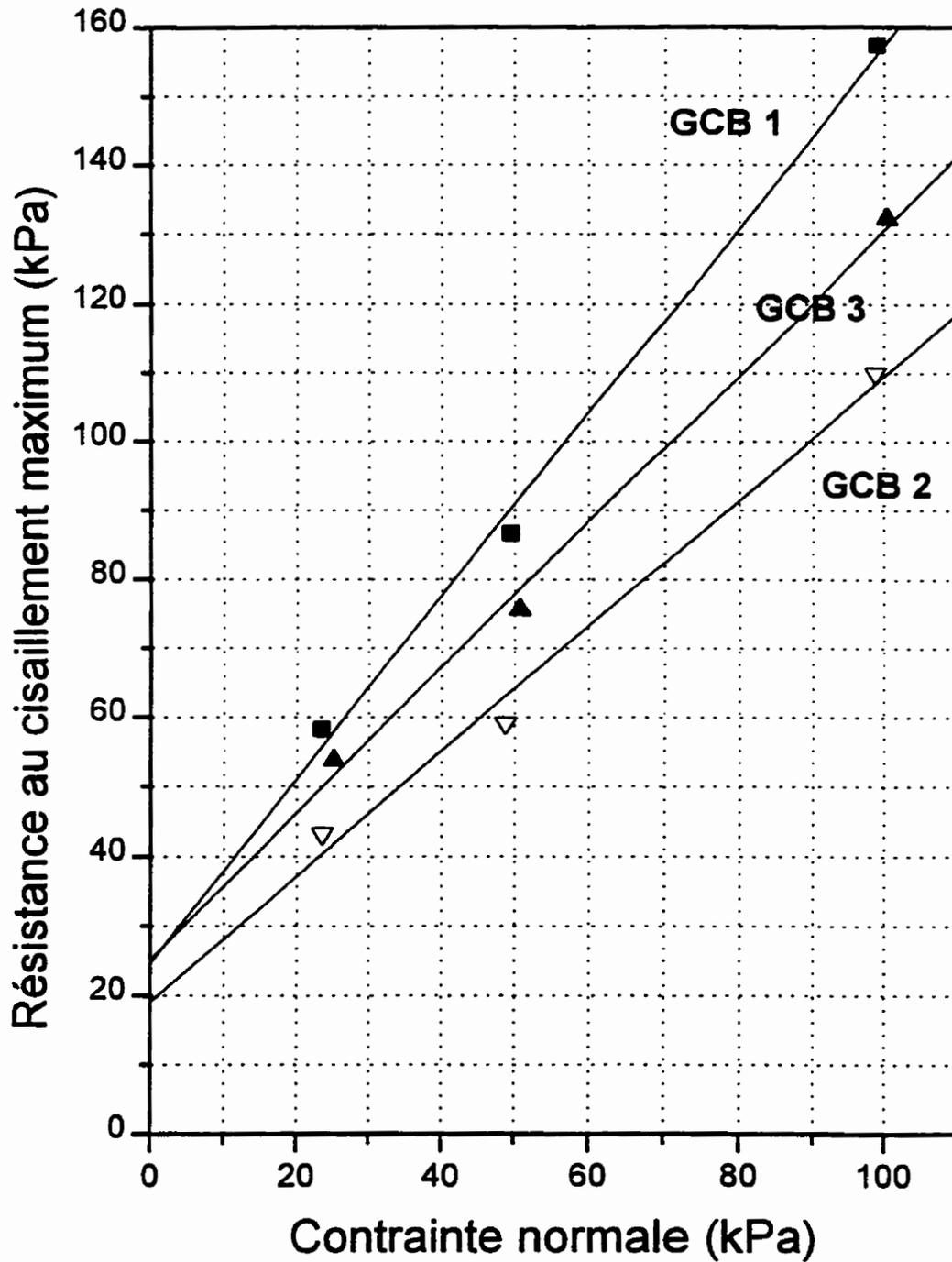
Tableau A2.3 - Résultats des essais de cisaillement pour les GCB 5 et 6.

| Vitesse<br>(mm/min) | Hydratation<br>(durée)      | Paramètres                        | GCB 5                             |                         |                         | GCB 6                   |                         |                          |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
|                     |                             |                                   | 25 kPa                            | 50 kPa                  | 100 kPa                 | 25 kPa                  | 50 kPa                  | 100 kPa                  |
| 1                   | Sec                         | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée |                                   |                         |                         |                         |                         |                          |
|                     | 2 H                         | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 39,4<br>56,6<br>2,1 H             | 61,0<br>52,2<br>2,0 H   | 106,2<br>55,1<br>2,0 H  | 33,5<br>109,3<br>1,5 H  | 53,4<br>100,3<br>2,0 H  | 99,9<br>92,5<br>1,7 H    |
|                     | 14 H                        | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 35,9<br>90,6<br>14,1 H            | 62,1<br>72,5<br>14,3 H  | 105,2<br>75,3<br>14,0 H | 38,1<br>123,8<br>14,5 H | 65,5<br>110,7<br>14,3 H | 117,4<br>101,9<br>14,1 H |
|                     | 14 H<br>submergé            | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 33,7<br>92,2<br>14,1 H            | 58,1<br>102,6<br>14,0 H | 100,7<br>86,8<br>14,1 H | 39,1<br>128,6<br>14,1 H | 61,9<br>117,2<br>14,0 H | 114,9<br>101,1<br>14,2 H |
|                     | 48 H                        | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée |                                   |                         |                         |                         |                         |                          |
|                     | >14 J                       | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 32,2<br>104,3<br>15,7 J           | 56,0<br>95,2<br>14,0 J  | 94,9<br>81,6<br>15,9 J  | 38,6<br>123,0<br>17,9 J | 55,1<br>121,9<br>15,1 J | 118,4<br>101,1<br>17,0 J |
|                     | >14 J<br>sans<br>contrainte | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 22,7<br>205,0<br>25,2 J           | 33,8<br>182,7<br>25,2 J | 41,3<br>172,3<br>25,7 J | 33,6<br>206,3<br>25,8 J | 52,9<br>187,1<br>25,9 J | 86,6<br>165,4<br>25,9 J  |
|                     | 0,1                         | 14 H                              | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 31,7<br>95,8<br>14,2 H  | 44,8<br>81,5<br>14,0 H  | 73,5<br>75,8<br>14,1 H  | 32,5<br>162,1<br>14,1 H | 56,7<br>119,2<br>14,8 H  |
| >14 J               |                             | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 27,2<br>107,2<br>18,8 J           | 44,6<br>98,7<br>15,9 J  | 88,8<br>79,4<br>14,3 J  | 29,5<br>147,2<br>15,9 J | 51,8<br>122,4<br>18,8 J | 78,8<br>116,9<br>25,8 J  |
| 0,01                | >14 J                       | $\tau_{max}$ (kPa)<br>w%<br>Durée | 26,3<br>109,4<br>15,1 J           | 41,2<br>95,1<br>15,9 J  | 66,8<br>83,2<br>15,0 J  | 27,6<br>154,9<br>17,4 J | 54,7<br>130,3<br>17,9 J | 82,4<br>110,2<br>17,0 J  |

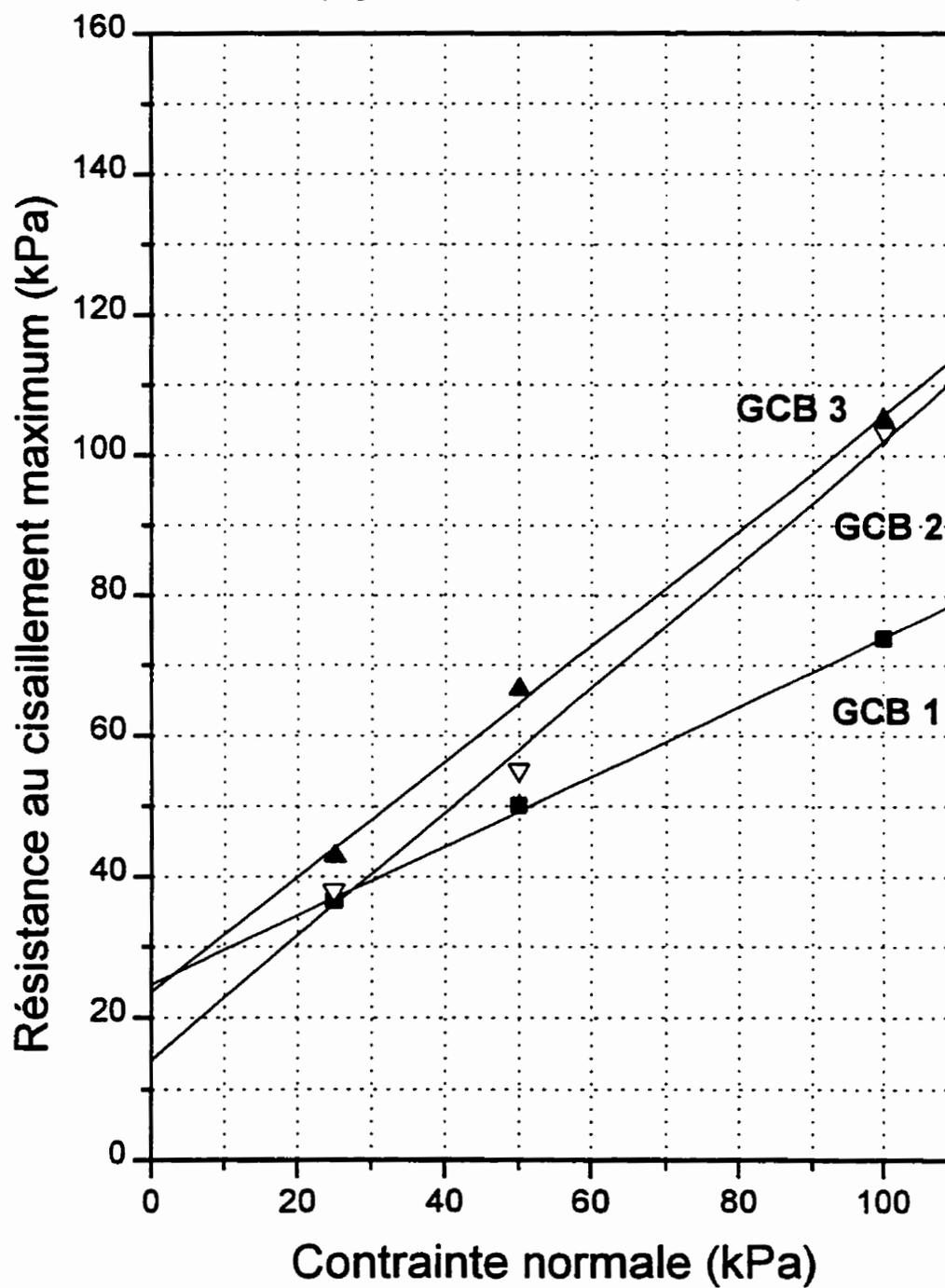
**ANNEXE III**

**GRAPHIQUES SERVANT À DÉTERMINER  
LES PARAMÈTRES DE MOHR-COULOMB**

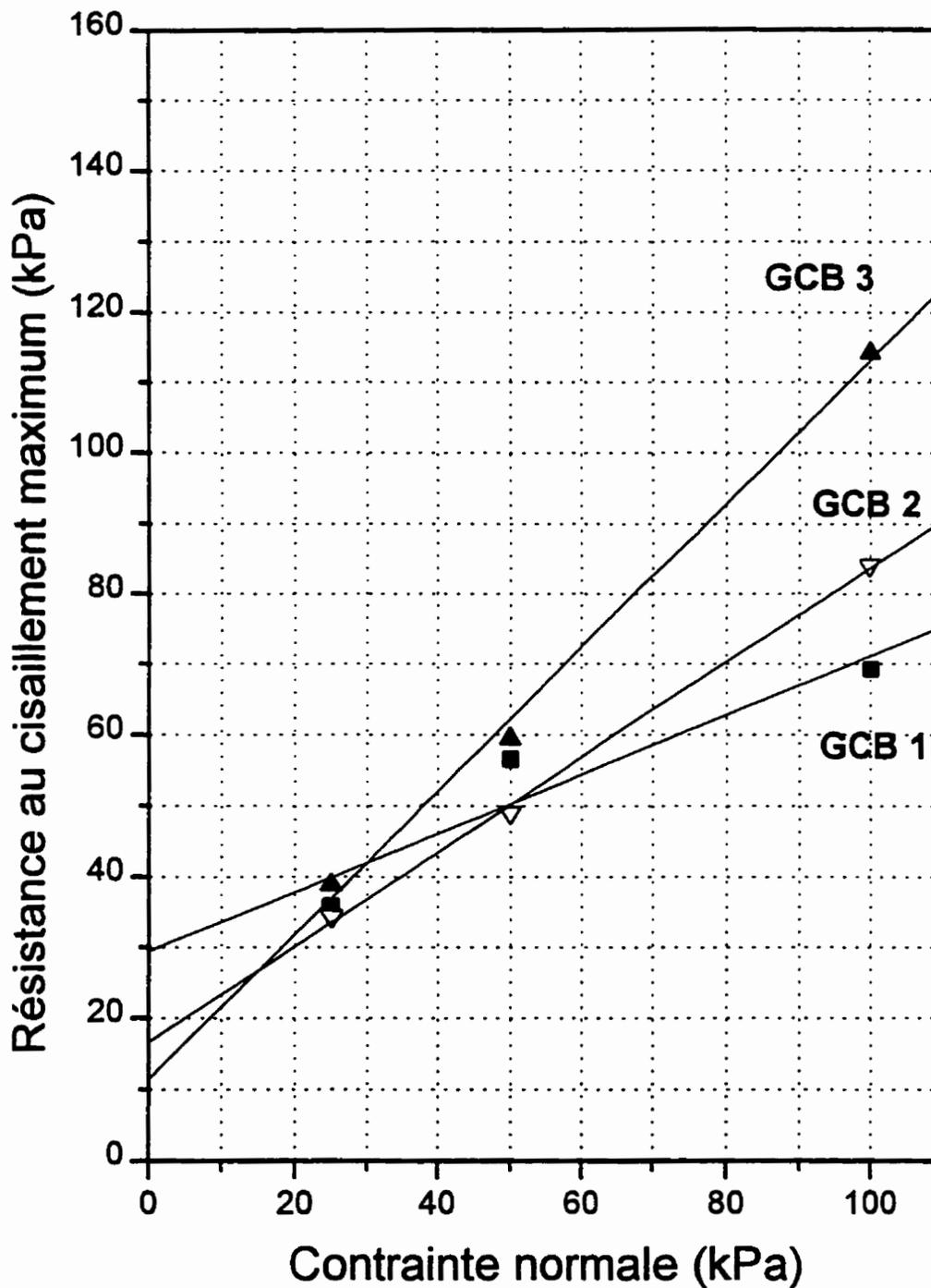
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 1, 2 et 3 - 1 mm/min  
(Sec)



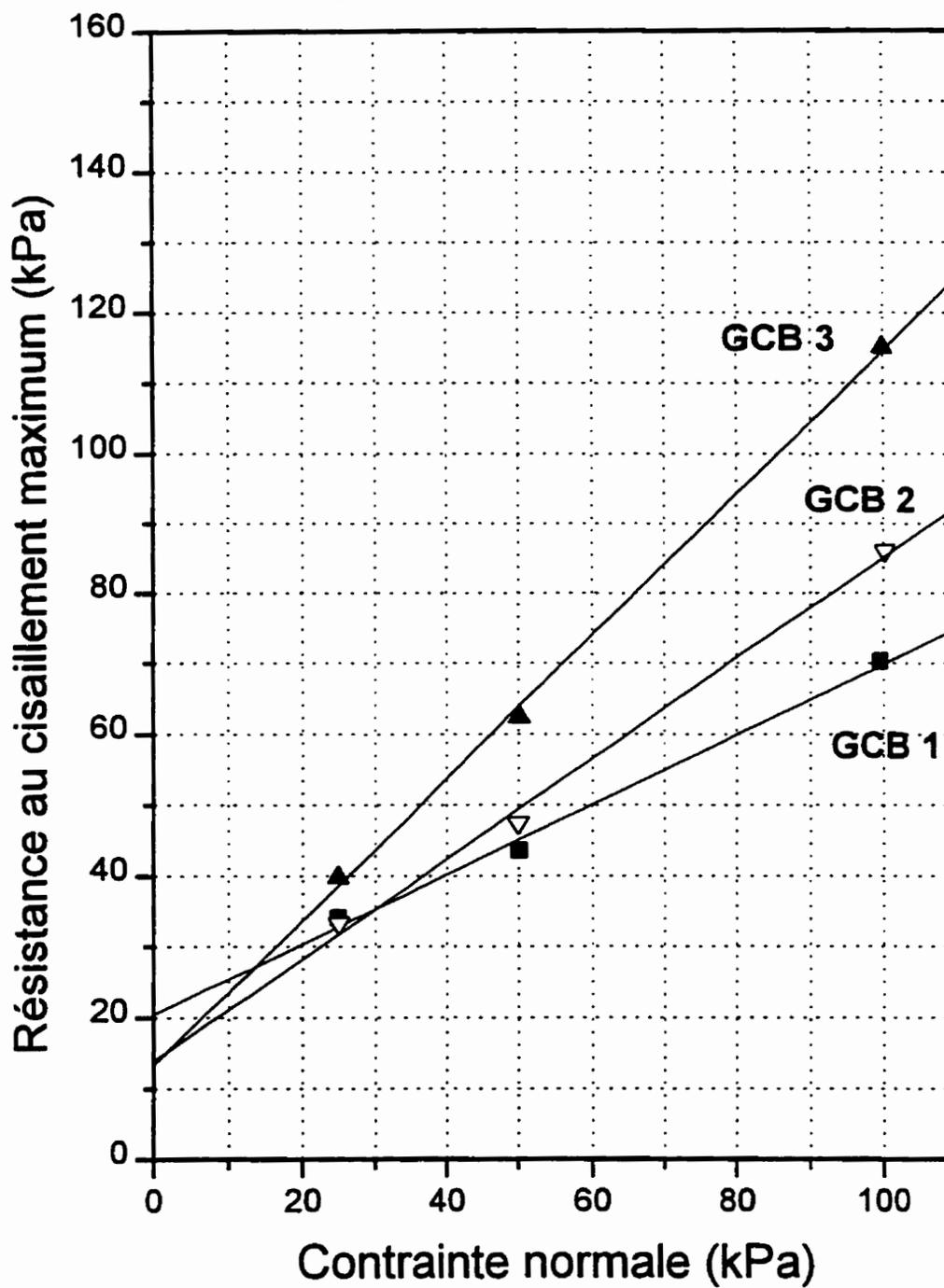
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 1, 2 et 3 - 1 mm/min  
(hydratation: 14 heures)



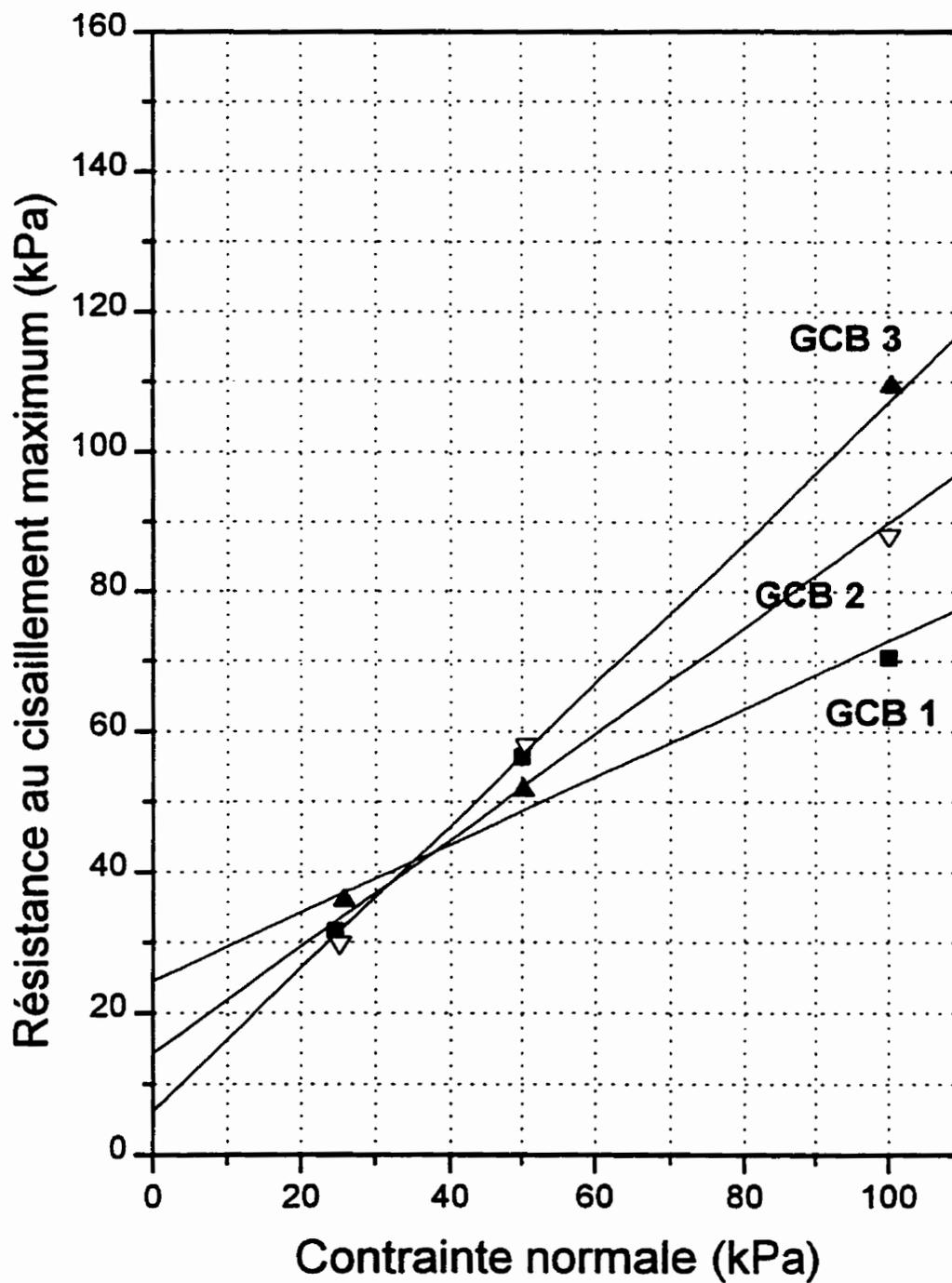
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 1, 2 et 3 - 1 mm/min  
(hydratation: 48 heures)



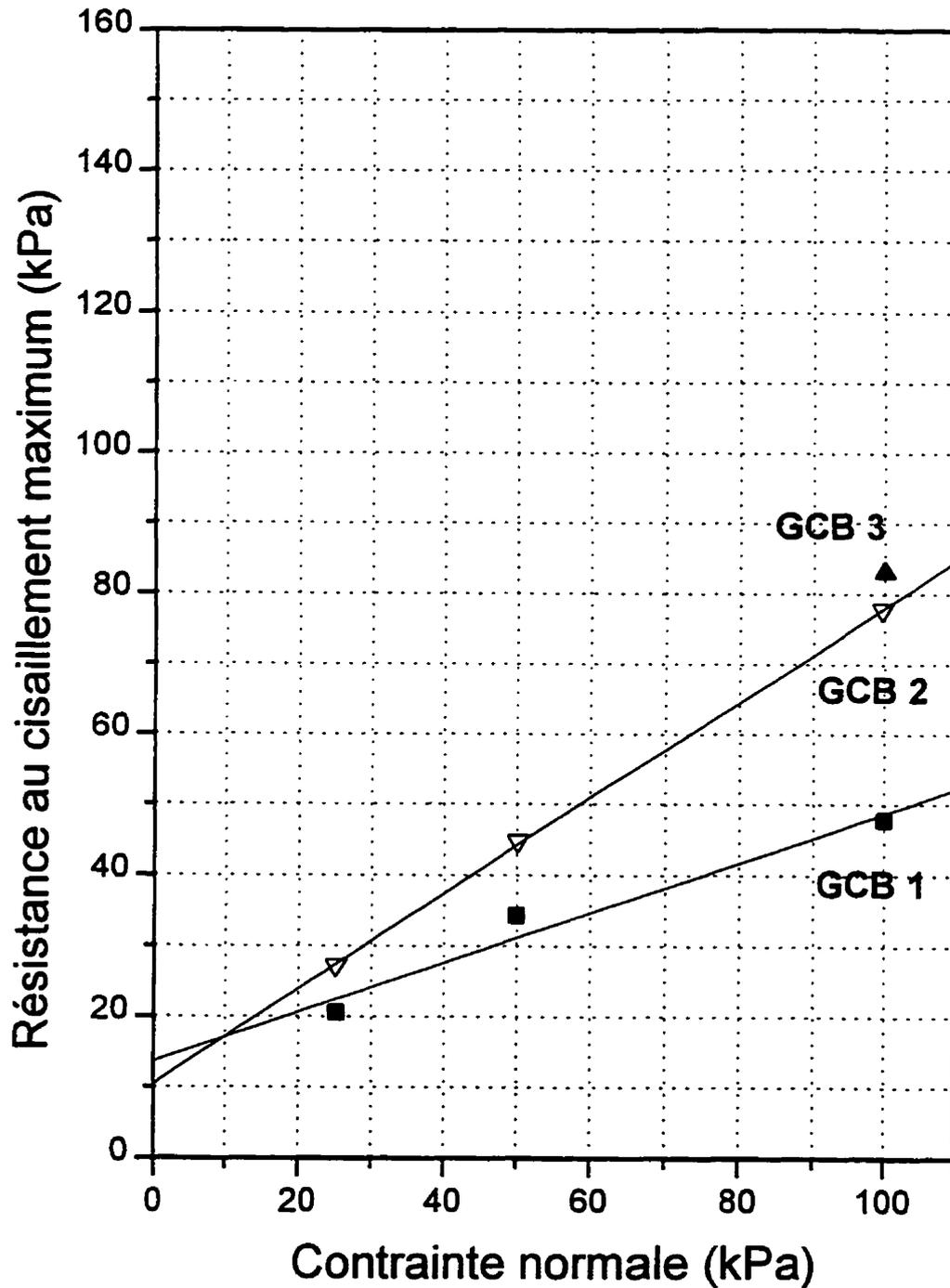
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 1, 2 et 3 - 1 mm/min  
(hydratation: 14 jours et +)



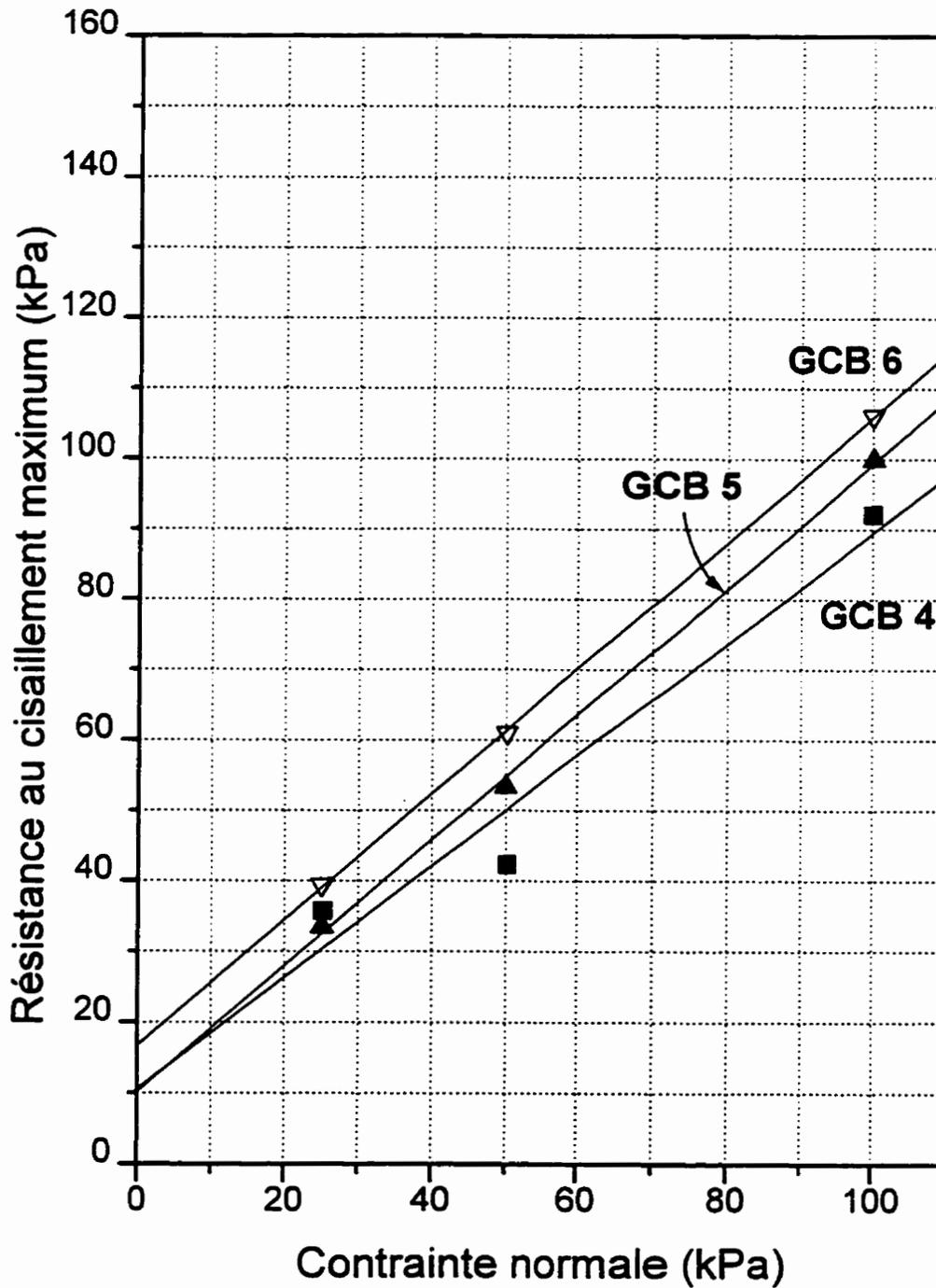
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 1, 2 et 3 - 0.1 mm/min  
(hydratation: 14 heures)



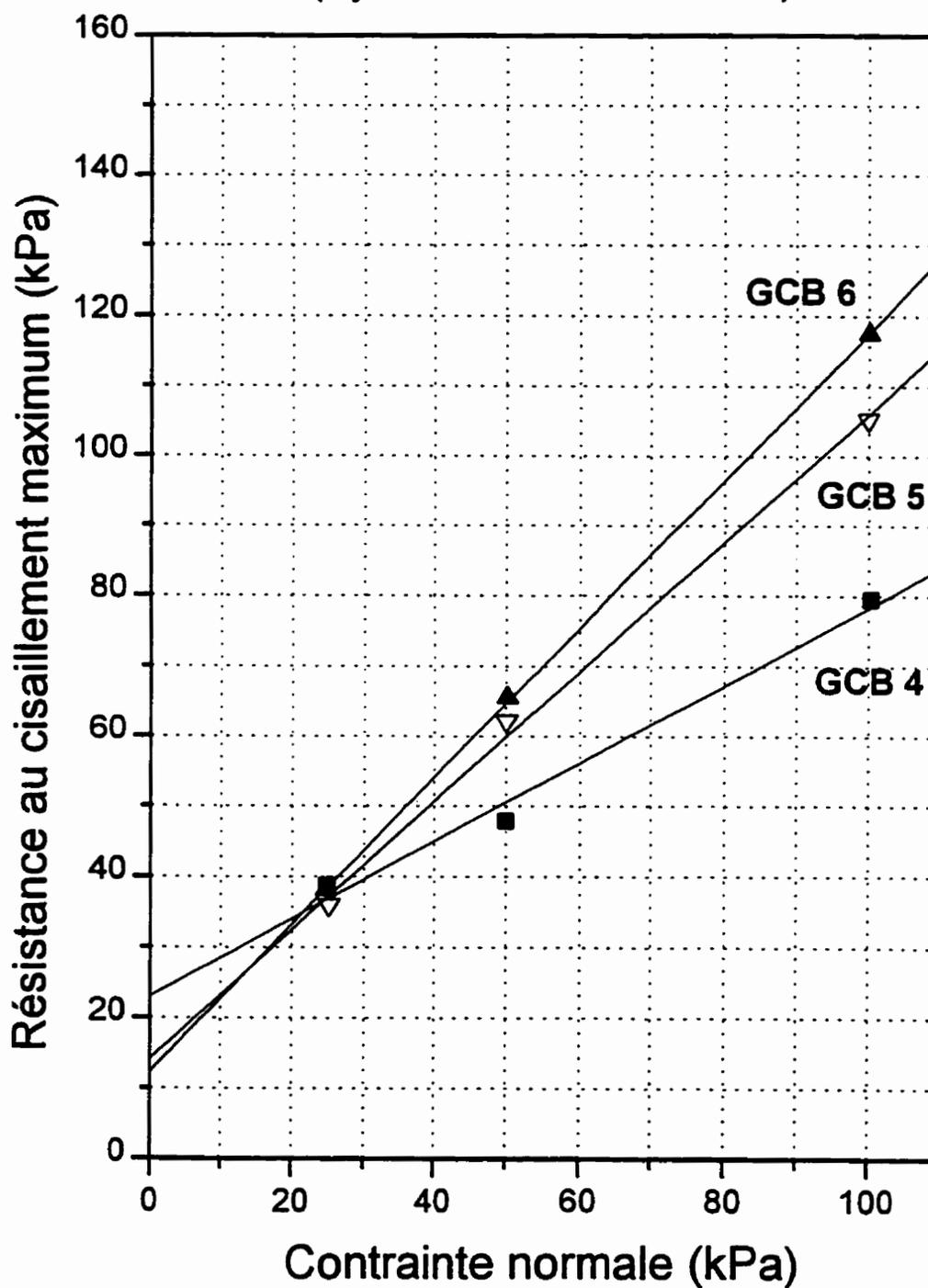
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 1, 2 et 3 - 0.1 mm/min  
(hydratation: 14 jours et +)



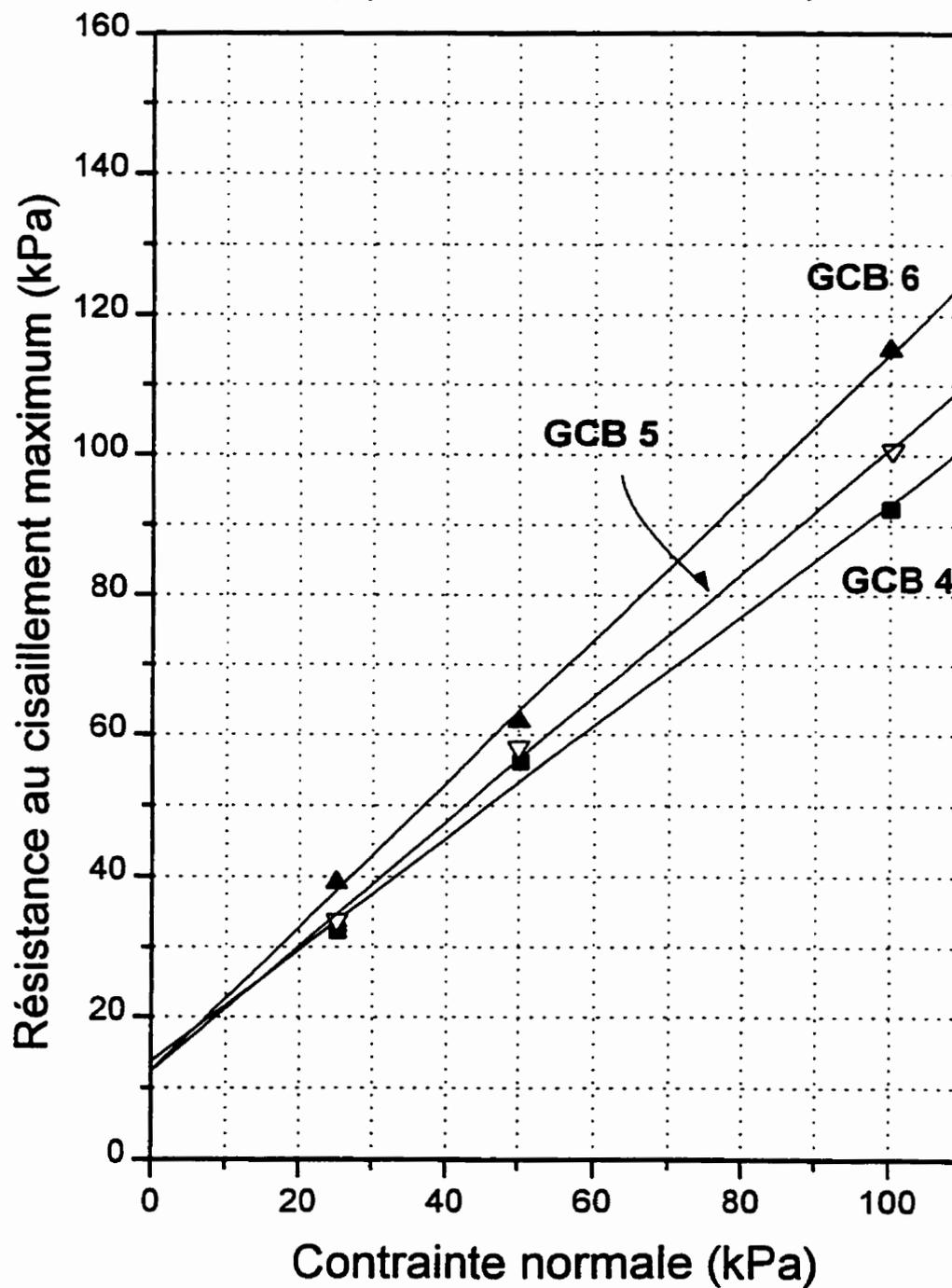
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4,5 et 6 - 1 mm/min  
(hydratation: 2 heures)



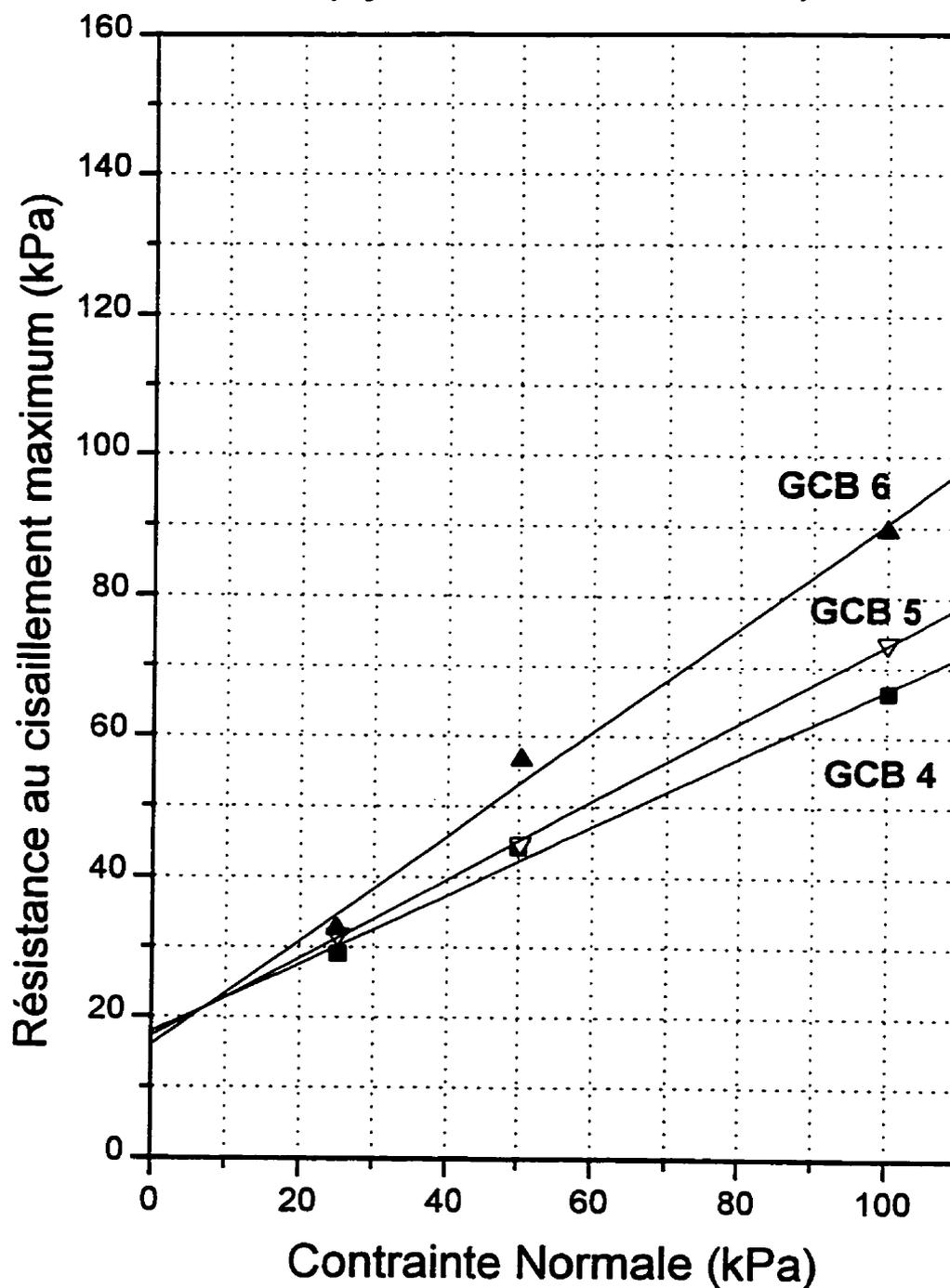
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4, 5 et 6 - 1 mm/min  
(hydratation: 14 heures)



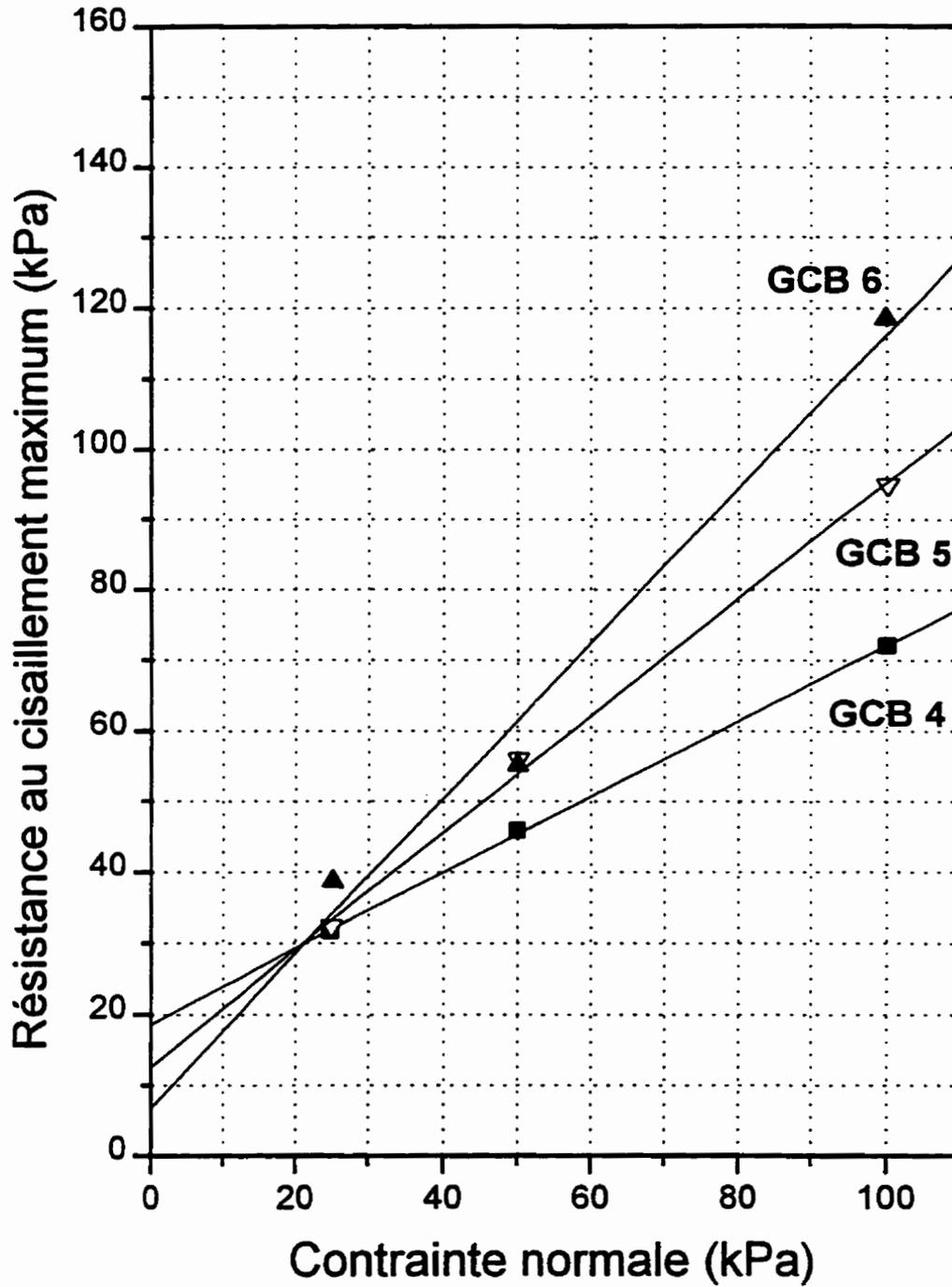
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4,5 et 6 - 1 mm/min - Submergé  
(hydratation: 14 heures)



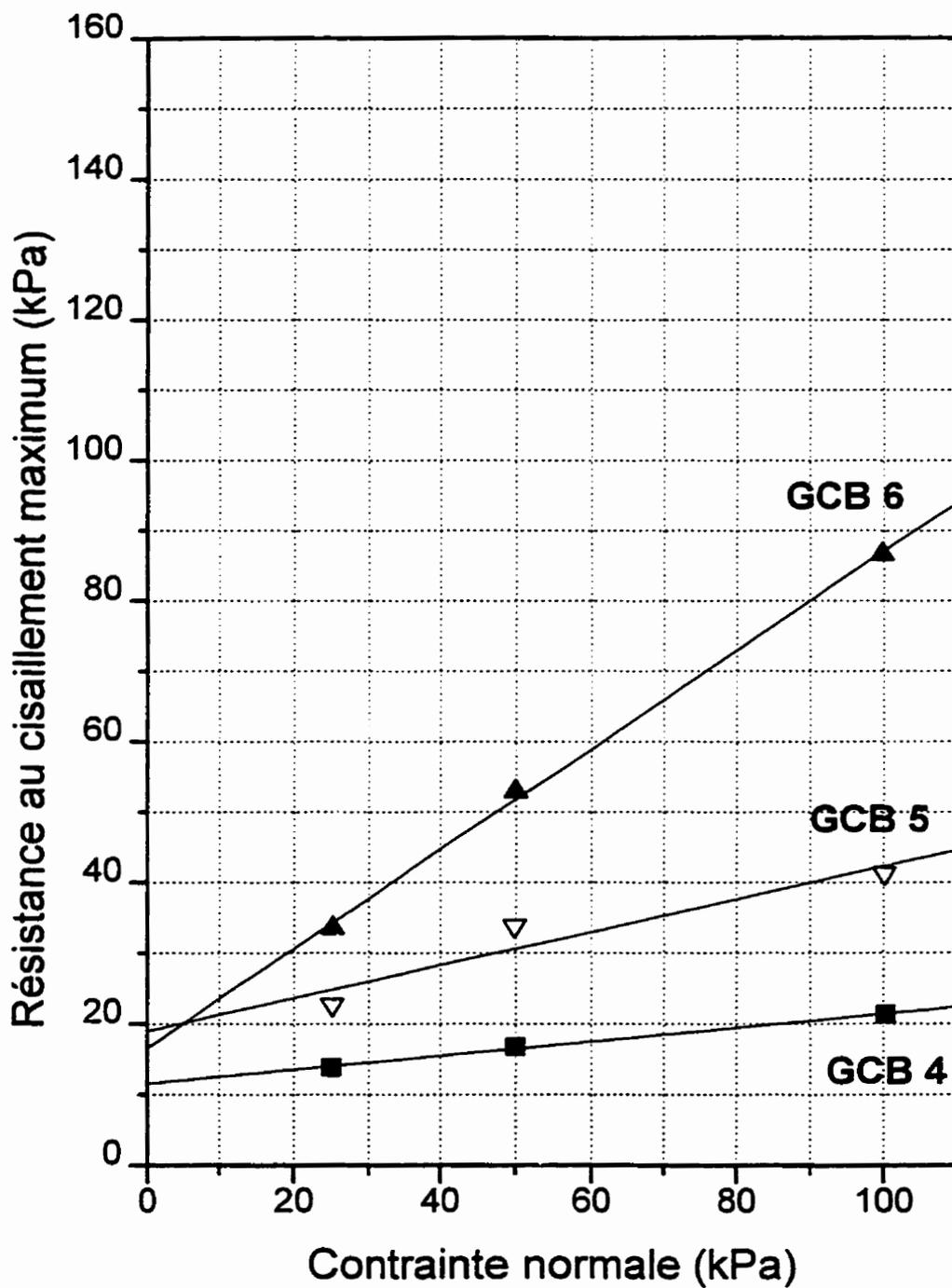
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4,5 et 6 - 0.1 mm/min  
(hydratation: 14 heures)



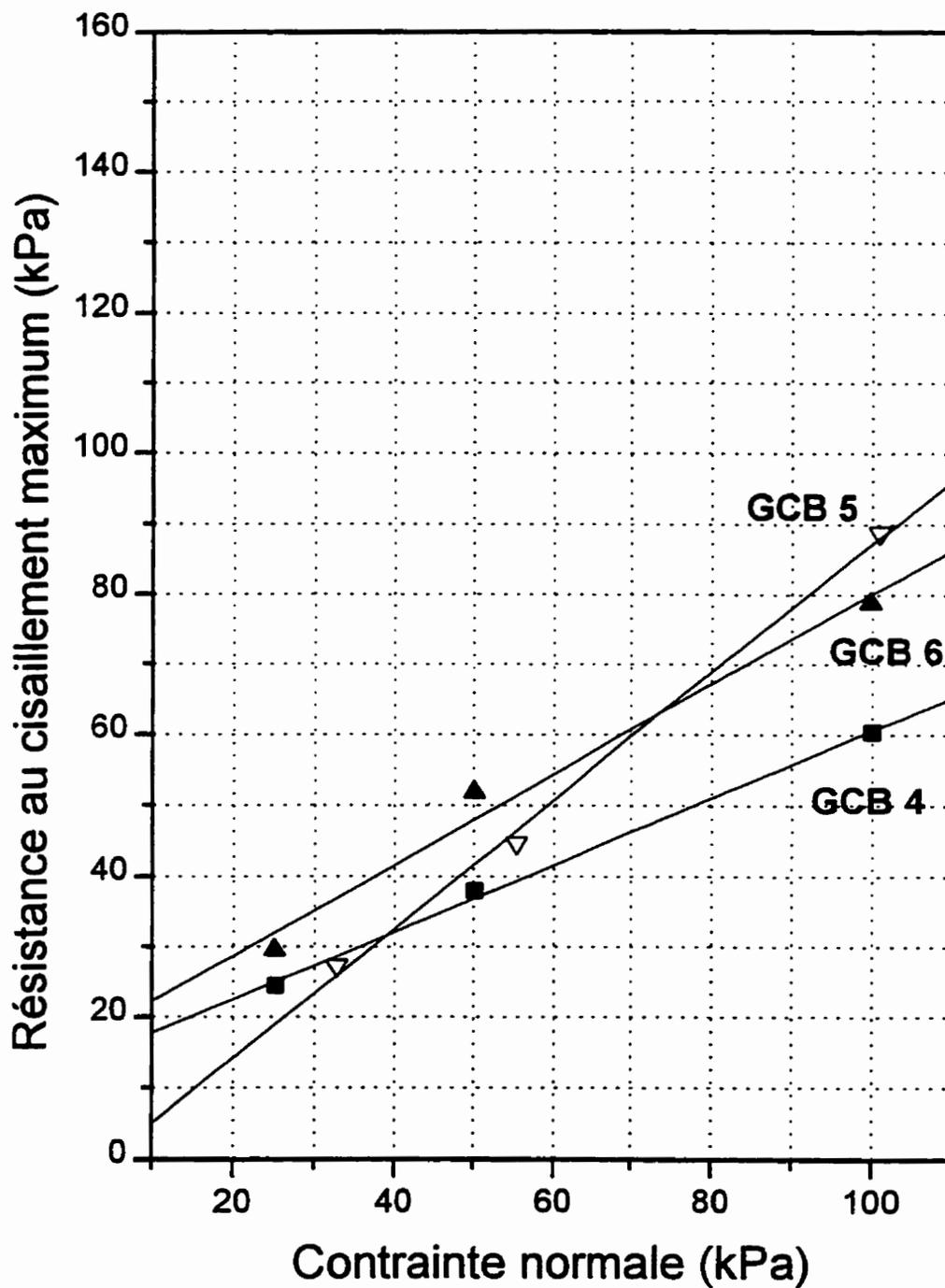
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4,5 et 6 - 1 mm/min  
(hydratation: 14 jours et +)



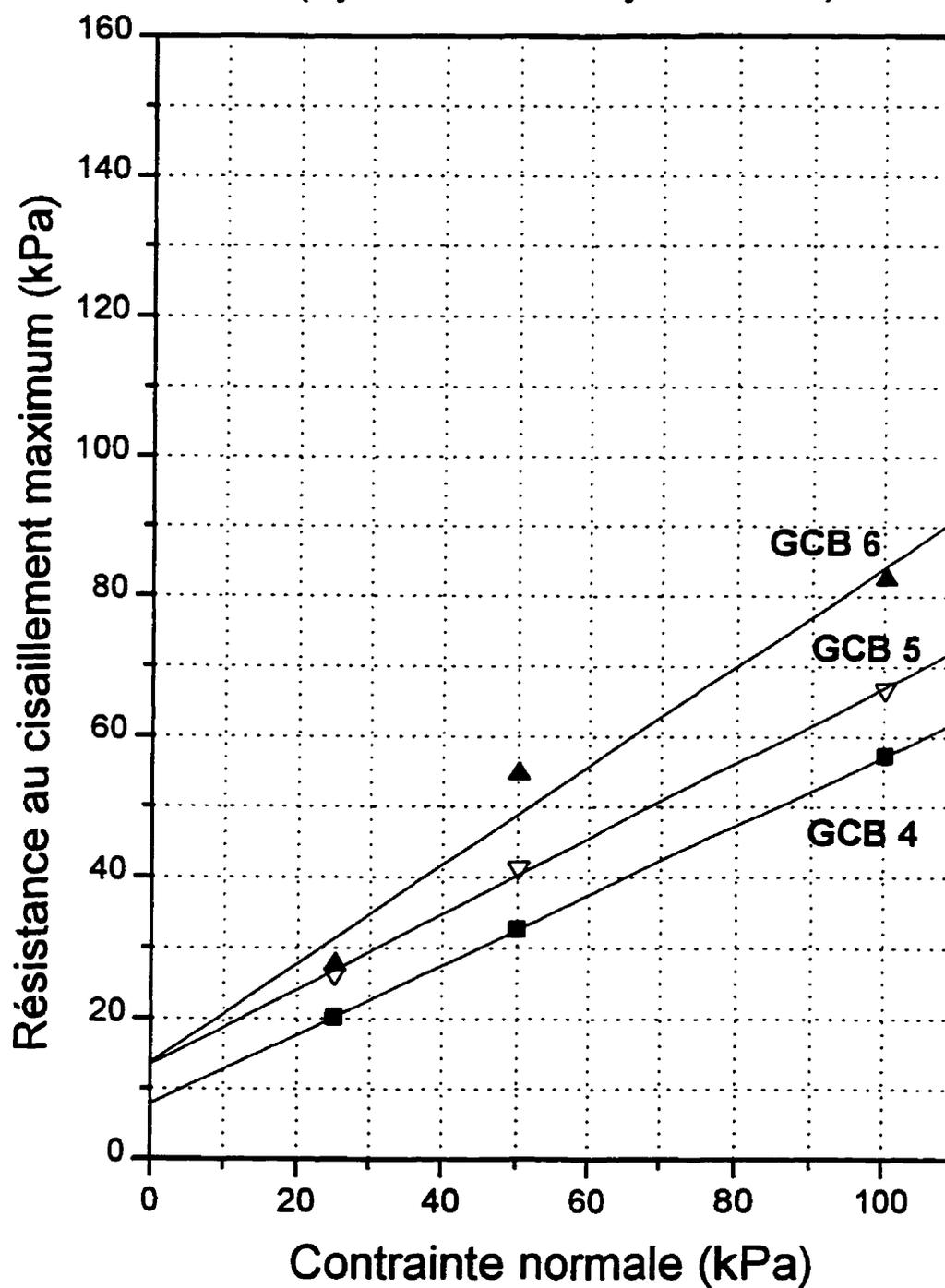
Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4,5 et 6 - 1 mm/min  
(hydratation: 14 jours et +, sans contrainte)



Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4,5 et 6 - 0.1 mm/min  
(hydratation: 14 jours et +)



Résistance au Cisaillement vs Contrainte Normale  
GCB No. 4,5 et 6 - 0.01 mm/min  
(hydratation: 14 jours et +)

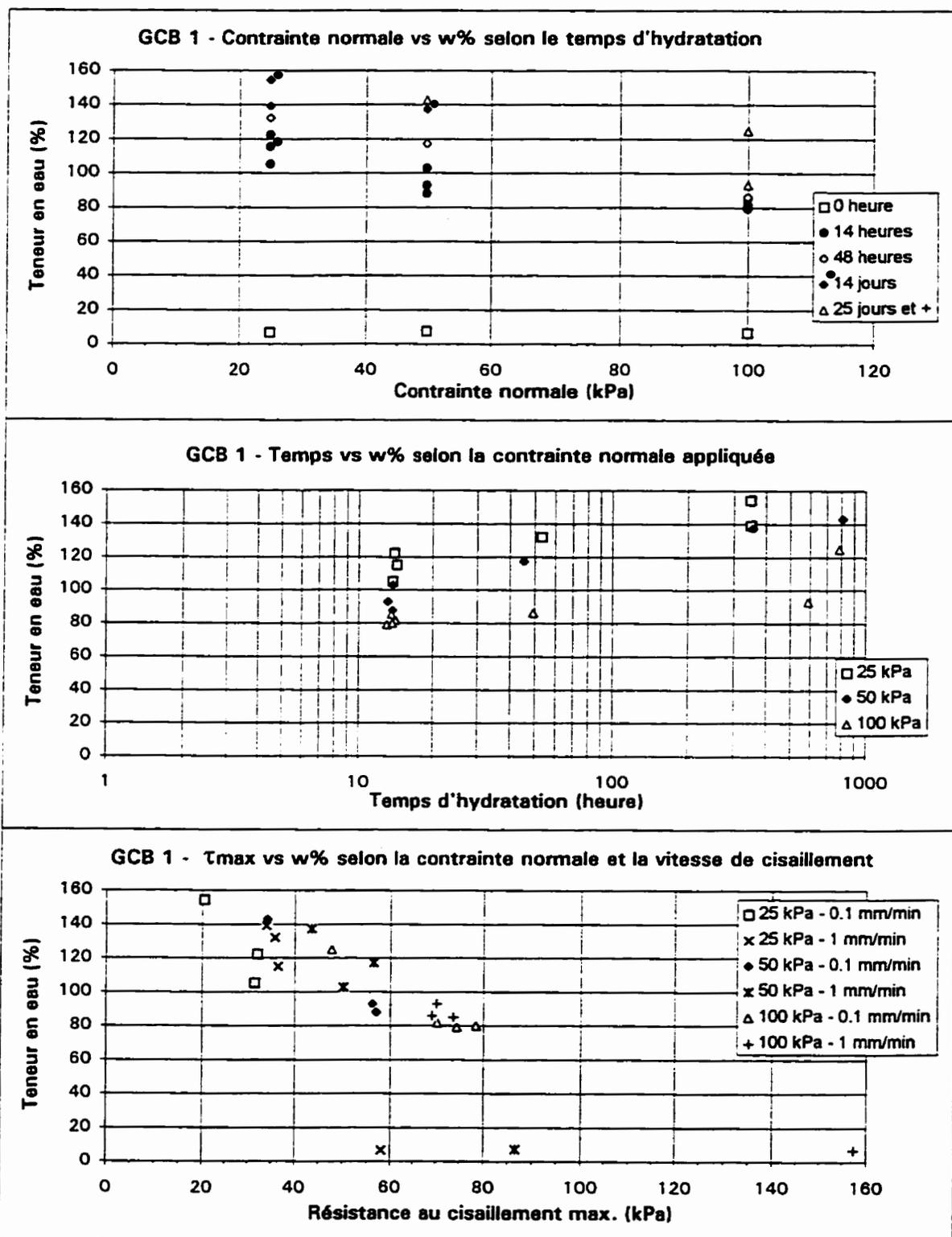


**ANNEXE IV**

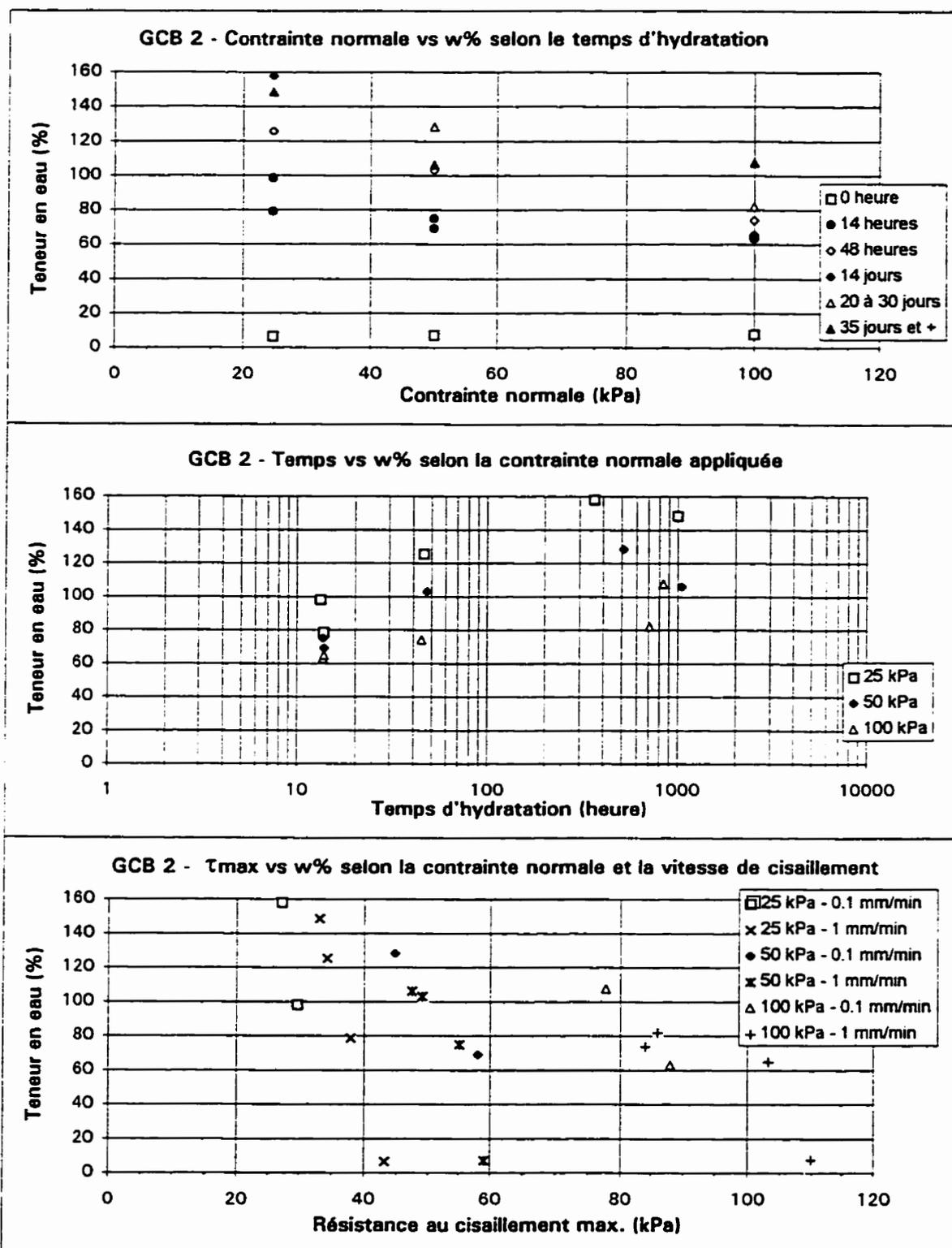
**RELATION ENTRE LE TEMPS D'HYDRATATION,  
LA CONTRAINTE NORMALE ET LA TENEUR EN EAU**

**RELATION ENTRE LA TENEUR EN EAU, LA CONTRAINTE NORMALE,  
LA VITESSE DE CISAILLEMENT ET  
LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT MAXIMUM**

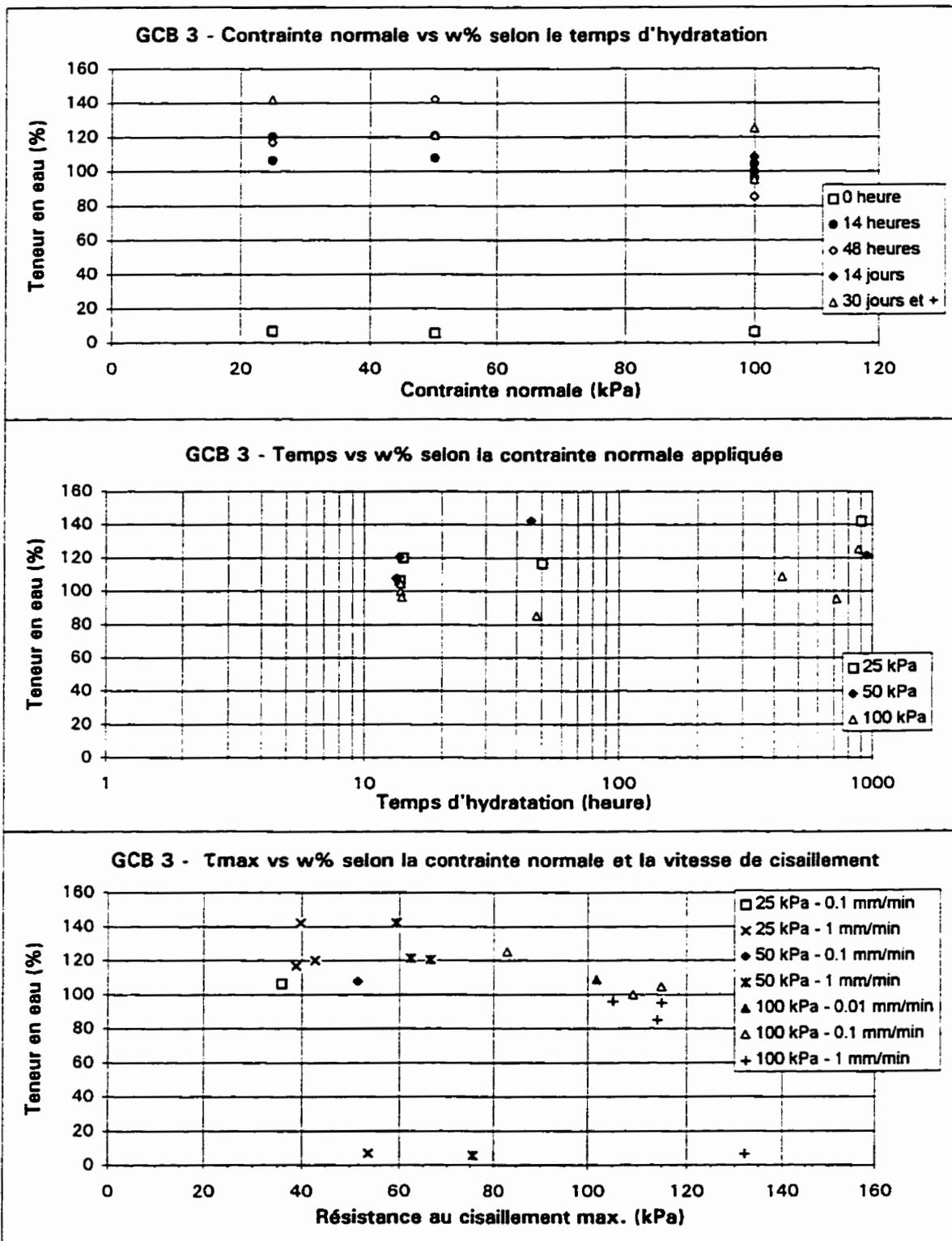
## GCB 1



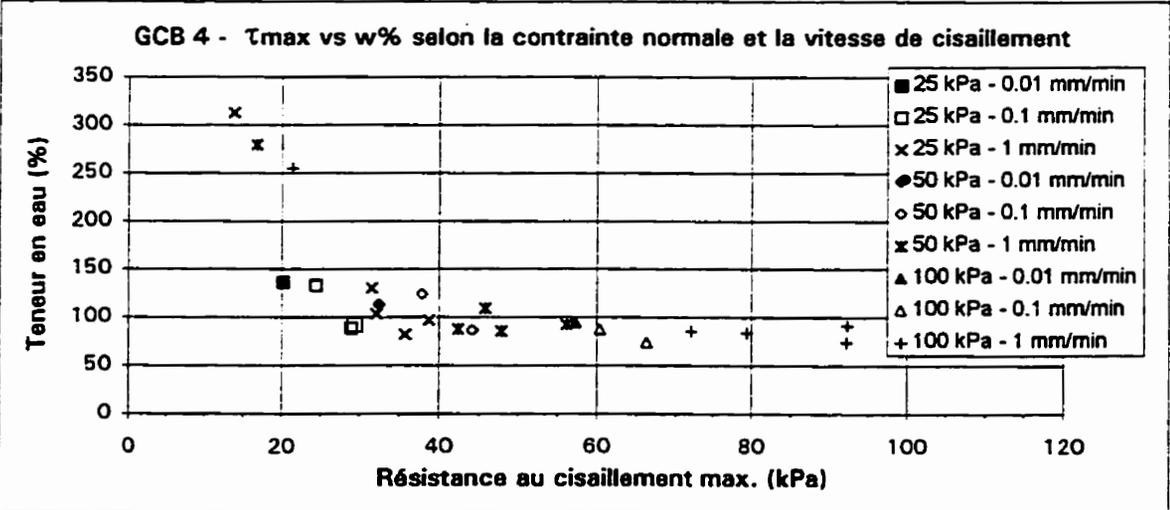
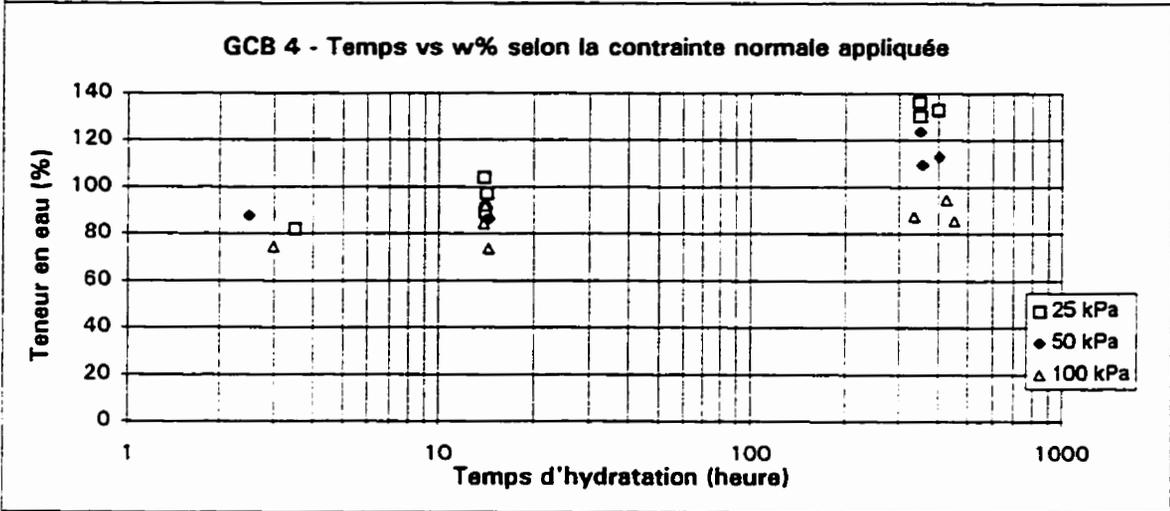
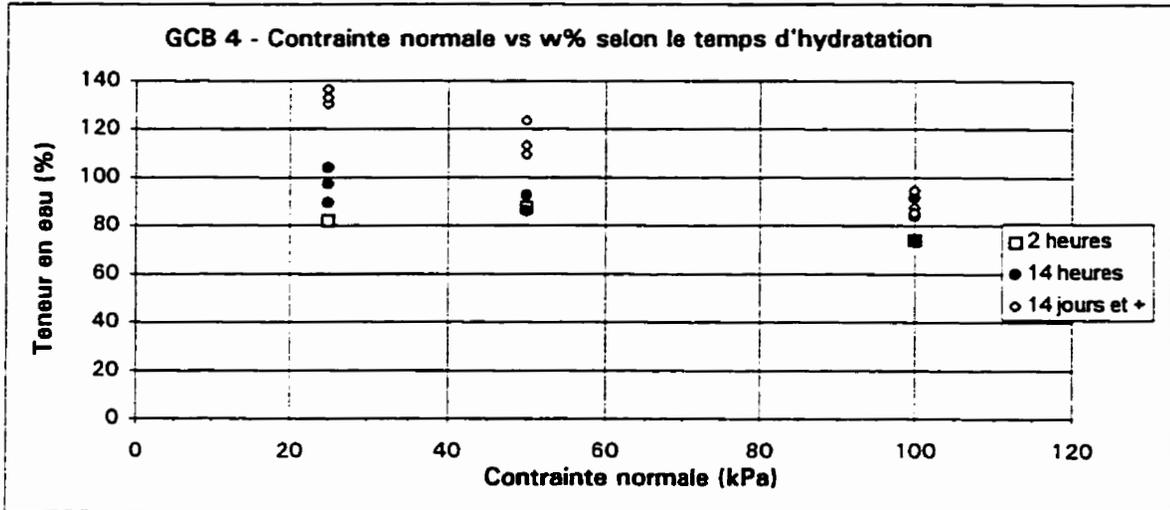
## GCB 2



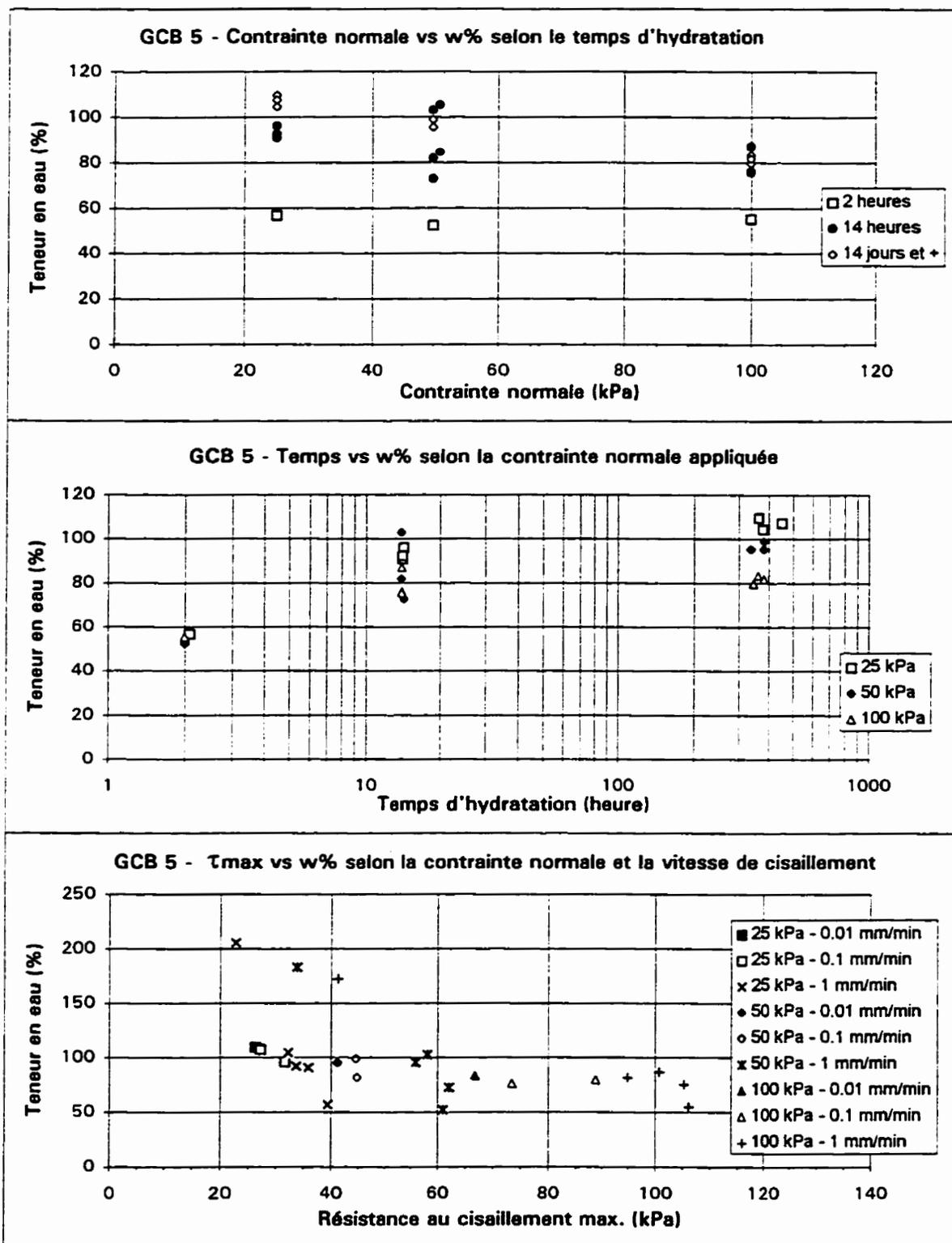
## GCB 3



### GCB 4



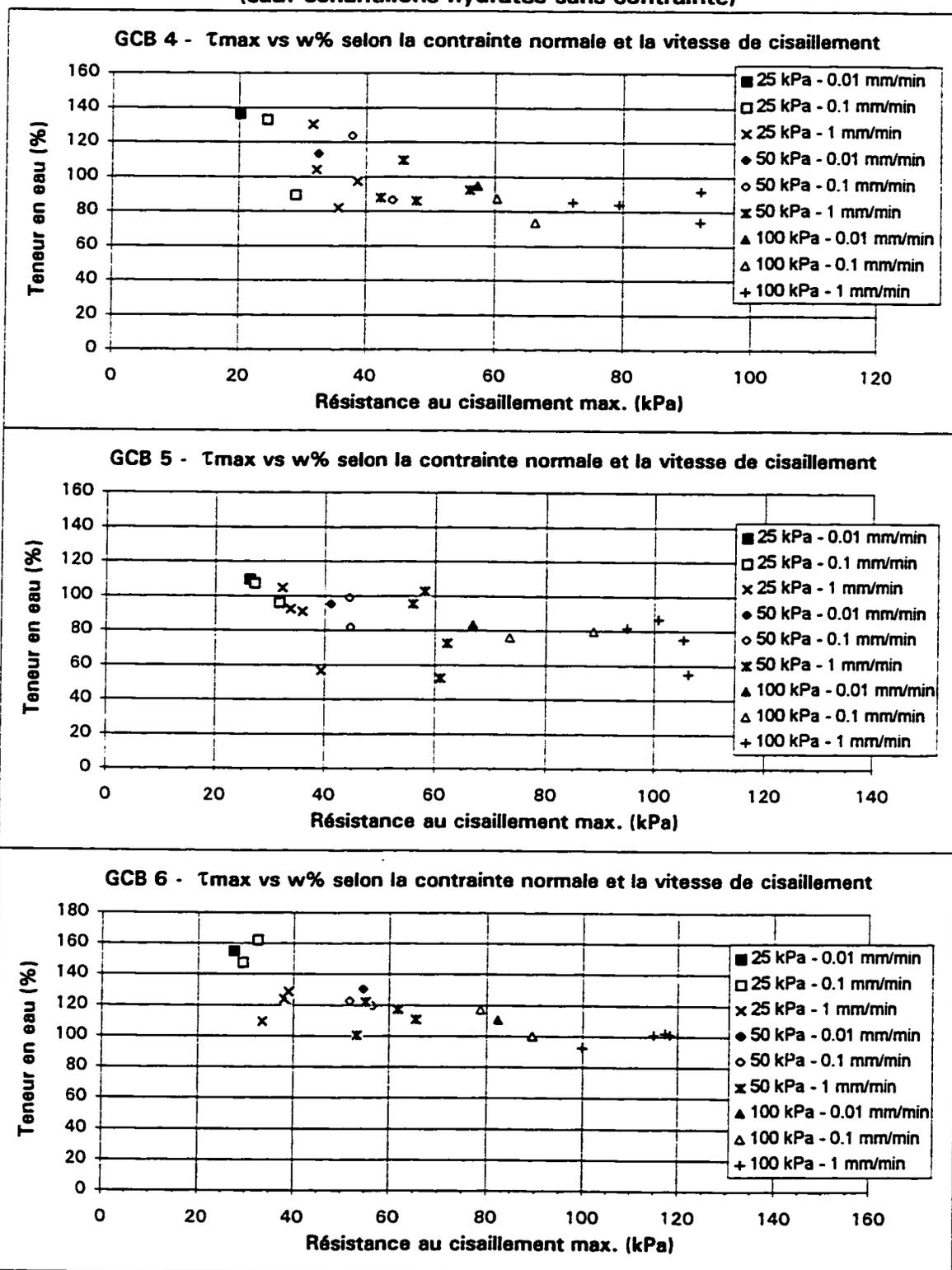
## GCB 5





## GCB 4, 5 et 6

(sauf échantillons hydratés sans contrainte)



**ANNEXE V**

**DÉPLACEMENT REQUIS POUR MOBILISER  
LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT MAXIMUM**

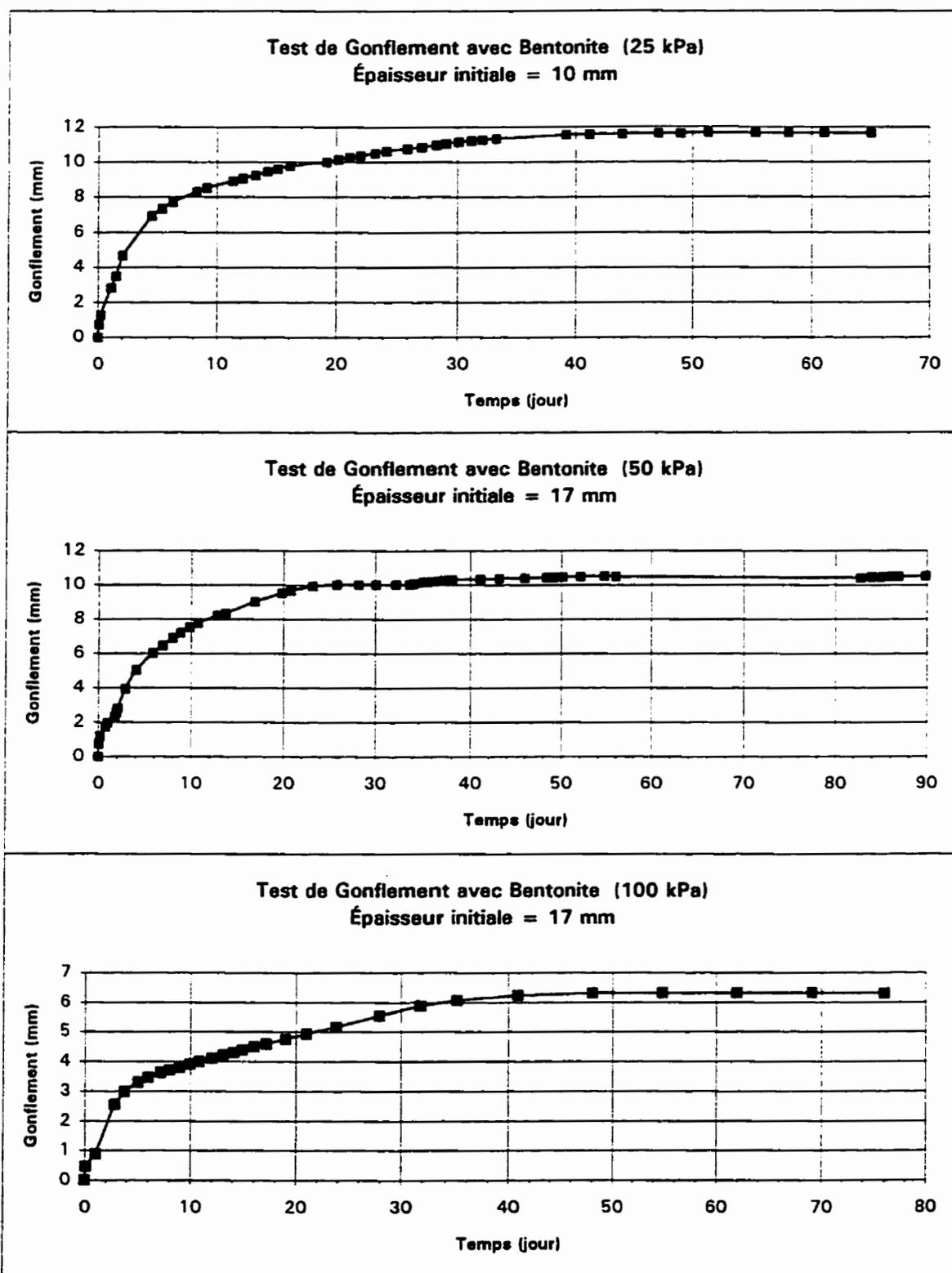
**ANNEXE V****Tableau A5.1 - Déplacement requis pour mobiliser  $\tau_{max}$  lors des essais de cisaillement direct des GCB.**

| Vitesse<br>(mm/min) | Hydratation<br>(durée)      | Contrainte<br>(kPa) | GCB et Déplacement (mm) |    |    |    |    |    |    |
|---------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------|----|----|----|----|----|----|
|                     |                             |                     | 1                       | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |    |
| 1                   | Sec                         | 25                  | 25                      | 55 | 70 |    |    |    |    |
|                     |                             | 50                  | 11                      | 43 | 7  |    |    |    |    |
|                     |                             | 100                 | 10                      | 13 | 10 |    |    |    |    |
|                     | 2 H                         | 25                  |                         |    |    | 33 | 42 | 64 |    |
|                     |                             | 50                  |                         |    |    | 9  | 30 | 19 |    |
|                     |                             | 100                 |                         |    |    | 9  | 11 | 13 |    |
|                     | 14 H                        | 25                  | 17                      | 44 | 36 | 25 | 36 | 46 |    |
|                     |                             | 50                  | 9                       | 18 | 17 | 10 | 17 | 26 |    |
|                     |                             | 100                 | 8                       | 12 | 13 | 8  | 9  | 12 |    |
|                     | 14 H<br>submergé            | 25                  |                         |    |    | 25 | 22 | 47 |    |
|                     |                             | 50                  |                         |    |    | 13 | 13 | 18 |    |
|                     |                             | 100                 |                         |    |    | 9  | 9  | 12 |    |
|                     | 48 H                        | 25                  | 15                      | 35 | 58 |    |    |    |    |
|                     |                             | 50                  | 9                       | 18 | 12 |    |    |    |    |
|                     |                             | 100                 | 8                       | 14 | 12 |    |    |    |    |
|                     | >14 J                       | 25                  | 17                      | 32 | 41 | 19 | 31 | 54 |    |
|                     |                             | 50                  | 9                       | 15 | 12 | 13 | 14 | 21 |    |
|                     |                             | 100                 | 7                       | 12 | 12 | 9  | 9  | 14 |    |
|                     | >14 J<br>sans<br>contrainte | 25                  |                         |    |    | 13 | 15 | 14 |    |
|                     |                             | 50                  |                         |    |    | 12 | 11 | 13 |    |
|                     |                             | 100                 |                         |    |    | 10 | 8  | 11 |    |
|                     | 0,1                         | 14 H                | 25                      | 12 | 26 | 19 | 22 | 23 | 14 |
|                     |                             |                     | 50                      | 6  | 14 | 13 | 10 | 9  | 13 |
|                     |                             |                     | 100                     | 8  | 14 | 12 | 9  | 9  | 11 |
| >14 J               |                             | 25                  | 9                       | 20 |    | 14 | 16 | 17 |    |
|                     |                             | 50                  | 7                       | 16 |    | 9  | 10 | 13 |    |
|                     |                             | 100                 | 6                       | 13 | 10 | 9  | 8  | 11 |    |
| 0,01                | >14 J                       | 25                  |                         |    |    | 11 | 12 | 25 |    |
|                     |                             | 50                  |                         |    |    | 8  | 9  | 13 |    |
|                     |                             | 100                 |                         |    | 11 | 9  | 8  | 10 |    |

**ANNEXE VI**

**COURBES PRÉSENTANT LE GONFLEMENT DE LA BENTONITE  
AVANT LE CISAILLEMENT DE LA BENTONITE SEULE**

## ANNEXE VI



**ANNEXE VII**

**INFLUENCE DE LA VITESSE DE CISAILLEMENT SUR  
LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT MAXIMUM  
(ENSEMBLE DES RÉSULTATS)**

## ANNEXE VII

**Tableau A7.1 - Influence de la vitesse de cisaillement sur la résistance au cisaillement maximale, pour tous les essais sauf les échantillons sec ou hydratés sans contrainte normale (107 essais).**

| GCB No. | Vitesse (mm/min)   | 0.01<br>N = 1    |      |       | 0.1<br>N = 2 |      |       | 1<br>N = 3 ou 4 |      |       |
|---------|--------------------|------------------|------|-------|--------------|------|-------|-----------------|------|-------|
|         |                    | Contrainte (kPa) | 25   | 50    | 100          | 25   | 50    | 100             | 25   | 50    |
| 1       | $\tau_{max}$ (kPa) |                  |      |       | 28.0         | 49.3 | 64.2  | 35.4            | 50.0 | 71.1  |
|         | W% (%)             |                  |      |       | 127          | 108  | 95    | 129             | 119  | 88    |
|         | $\tau_{10}$        |                  |      |       |              |      |       | +26%            | +1%  | +11%  |
|         |                    |                  |      |       |              |      |       |                 |      |       |
| 2       | $\tau_{max}$ (kPa) |                  |      |       | 28.5         | 51.4 | 83.0  | 35.1            | 50.5 | 91.1  |
|         | W% (%)             |                  |      |       | 128          | 99   | 85    | 117             | 94   | 73    |
|         | $\tau_{10}$        |                  |      |       |              |      |       | +23%            | -2%  | +10%  |
|         |                    |                  |      |       |              |      |       |                 |      |       |
| 3       | $\tau_{max}$ (kPa) |                  |      | 101.9 | 35.9         | 51.6 | 109.3 | 40.5            | 62.8 | 111.4 |
|         | W% (%)             |                  |      | 108   | 106          | 108  | 99    | 126             | 128  | 92    |
|         | $\tau_{10}$        |                  |      |       |              |      |       | +7%             | +13% | +22%  |
|         | $\tau_{100}$       |                  |      |       |              |      |       |                 |      | +9%   |
| 4       | $\tau_{max}$ (kPa) | 20.2             | 32.6 | 57.3  | 26.7         | 41.1 | 63.4  | 34.6            | 48.0 | 84.0  |
|         | W% (%)             | 136              | 113  | 94    | 111          | 105  | 80    | 103             | 94   | 84    |
|         | $\tau_{10}$        |                  |      |       | +32%         | +26% | +11%  | +30%            | +17% | +32%  |
|         | $\tau_{100}$       |                  |      |       |              |      |       | +71%            | +47% | +47%  |
| 5       | $\tau_{max}$ (kPa) | 26.3             | 41.2 | 66.8  | 29.5         | 44.7 | 81.2  | 35.3            | 59.3 | 101.8 |
|         | W% (%)             | 109              | 95   | 83    | 102          | 90   | 78    | 86              | 81   | 75    |
|         | $\tau_{10}$        |                  |      |       | +12%         | +8%  | +22%  | +20%            | +33% | +25%  |
|         | $\tau_{100}$       |                  |      |       |              |      |       | +34%            | +44% | +52%  |
| 6       | $\tau_{max}$ (kPa) | 27.6             | 54.6 | 82.4  | 31.5         | 54.3 | 84.1  | 42.3            | 59.0 | 112.7 |
|         | W% (%)             | 155              | 130  | 110   | 155          | 121  | 109   | 121             | 113  | 97    |
|         | $\tau_{10}$        |                  |      |       | +14%         | -1%  | +2%   | +34%            | +9%  | +34%  |
|         | $\tau_{100}$       |                  |      |       |              |      |       | +53%            | +8%  | +37%  |
| Moy 1   | $\tau_{10}$        |                  |      |       | +19%         | +11% | +11%  | +24%            | +13% | +19%  |
|         | $\tau_{100}$       |                  |      |       |              |      |       | +53%            | +33% | +36%  |
| Moy 2   | $\tau_{10}$        |                  |      |       | +14%         |      |       | +19%            |      |       |
|         | $\tau_{100}$       |                  |      |       |              |      |       | +41%            |      |       |

**ANNEXE VIII**

**PRÉCISION DES MESURES**

## ANNEXE VIII

### **Précision des mesures**

Plusieurs instruments ont été utilisés dans la phase expérimentale de cette étude. Chaque mesure effectuée possède une certaine incertitude ou erreur qui l'affecte à différents degrés. Les principales mesures servent à déterminer la teneur en eau, la contrainte normale et la résistance au cisaillement. Voici la liste des appareils de mesure ayant pu affecter les résultats obtenus, ainsi que l'erreur absolue associée à chaque lecture:

- balance: 0.01 g
- capteur de charge (charge normale): 0.1 kg
- capteur de charge (cisaillement): 0.5 kg
- capteur de déplacement: 0.05 mm
- temps: 1 s (montre), 0.001 s (ordinateur)

La mesure du temps intervient directement seulement sur le contrôle de la vitesse de cisaillement et son incertitude devient négligeable considérant que le contrôle est fait par ordinateur. La mesure du temps est également utilisée lors de l'hydratation des GCB, cependant cette mesure n'est pas utilisée directement mais sert à faire varier la teneur en eau de la bentonite.

Le capteur de déplacement intervient directement lors du contrôle de la vitesse de cisaillement. Puisque ce contrôle se fait en prenant le déplacement divisé par le temps écoulé, contrôlé par ordinateur, l'erreur relative devient négligeable, c'est-à-dire qu'elle est déjà inférieure à 1% lorsque le déplacement excède 5 mm. Le déplacement n'intervient pas dans la mesure du cisaillement, de la contrainte normale ni de la teneur en eau.

Le capteur de charge utilisé pour la charge normale possède une incertitude absolue de 0.1 kg pour les charges utilisées. Considérant une surface de 0.3 par 0.3 m, afin d'obtenir les contraintes normales de 25, 50 et 100 kPa il faut appliquer des charges de 231, 462 et 924 kg respectivement. L'erreur absolue de 0.1 kg devient donc négligeable sur la mesure de la contrainte normale appliquée.

Le capteur de charge utilisé pour la mesure de la résistance au cisaillement possède une erreur absolue plus grande que le capteur précédent, cependant il peut mesurer des charges plus élevées. Les résistances au cisaillement maximum mesurées varient de 20,2 à 157,4 kPa, ce qui représente des charges allant de 189 à 1454 kg et les erreurs relatives sur ces charges vont de 0,26% à 0,034%, ce qui est négligeable en terme de contrainte normale (kPa). Par exemple, la mesure de la résistance résiduelle au cisaillement la plus faible, soit 3 kPa, possède une erreur relative de 1,80%, ce qui représente en valeur absolue une incertitude de plus ou moins 0,054 kPa, donc à toute fin pratique négligeable.

La balance est utilisée pour déterminer la teneur en eau de la bentonite. Par définition, la teneur en eau se calcule comme suit:

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

où  $M_w$  correspond à la masse d'eau et  $M_s$  correspond à la masse de sol sec. Chaque valeur est obtenue suite à la différence de deux mesures effectuées avec la balance, donc l'erreur absolue sur  $M_w$  et  $M_s$  est de 0,02 g, car la précision de la balance (0,01 g) s'ajoute comme erreur absolue avec chaque mesure.

L'incertitude relative de la teneur en eau s'exprime par l'équation suivante:

$$\frac{\Delta w}{w} = \frac{\Delta M_w}{M_w} + \frac{\Delta M_s}{M_s}$$

et l'erreur absolue de la teneur en eau devient

$$\Delta w = \left( \frac{\Delta M_w}{M_w} + \frac{\Delta M_s}{M_s} \right) w$$

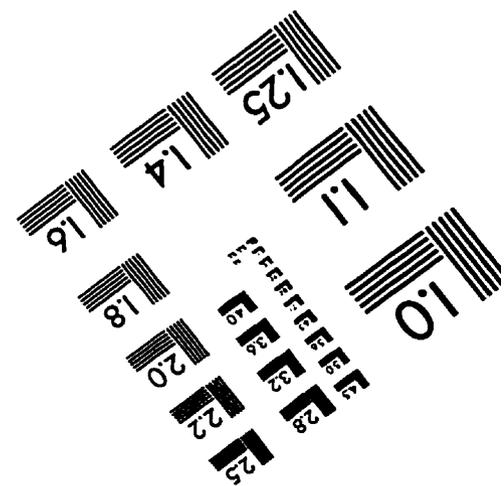
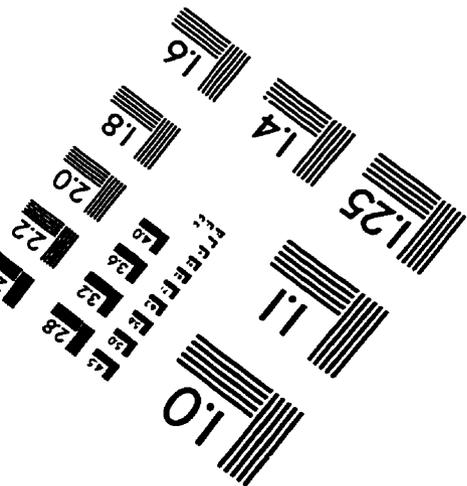
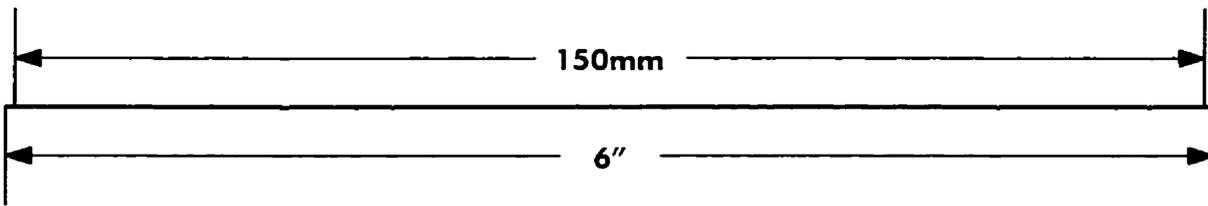
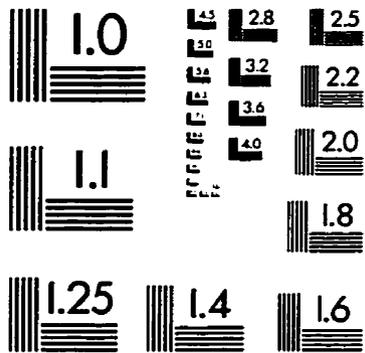
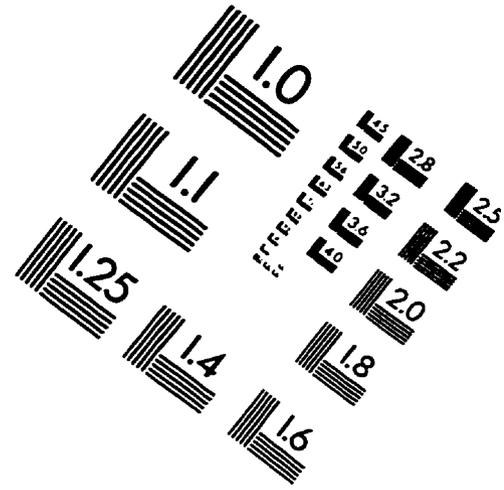
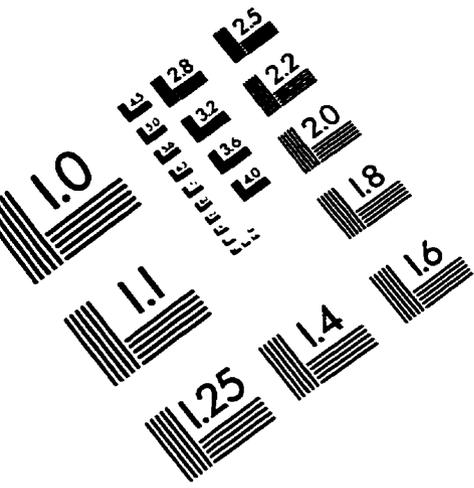
Afin d'avoir une idée de l'ordre de grandeur que peut représenter l'erreur absolue sur la teneur en eau, voici quelques exemples:

|  |                         |
|--|-------------------------|
| GCB no. 4, 25 kPa, 1 mm/min, 14 H:     | $w\% = 97,04 \pm 0,14$  |
| GCB no. 5, 100 kPa, 1 mm/min, 2 H:     | $w\% = 55,10 \pm 0,09$  |
| GCB no. 6, 100 kPa, 0,01 mm/min, 14 J: | $w\% = 110,15 \pm 0,15$ |
| GCB no. 2, 25 kPa, 0,1 mm/min, 14 J:   | $w\% = 157,72 \pm 0,24$ |

L'erreur absolue peut être assez grande pour affecter par plus ou moins quelques dixièmes de 1% les valeurs de teneur en eau se trouvant dans les tableaux A2.1 à A2.3.

En général, la variabilité intrinsèque de la teneur en eau d'une masse de sol est supérieure à l'incertitude d'une mesure isolée. Cependant, plusieurs mesures doivent être effectuées sur le même sol afin de faire cette évaluation. Aucune donnée n'est disponible pour faire cette évaluation.

# IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)



**APPLIED IMAGE, Inc**  
1653 East Main Street  
Rochester, NY 14609 USA  
Phone: 716/482-0300  
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved