UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

FILTRATION DES SUSPENSIONS PAR LES GÉOTEXTILES NON TISSÉS

NEKROUF ZIANI

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

PHILOSOPHIAE DOCTOR (Ph.D)

GÉNIE CIVIL

Mars 1996

© Nekrouf Ziani 1996

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 reference

Our file Notre reference

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.

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.

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 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.

0-612-26443-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée:

FILTRATION DES SUSPENSIONS PAR LES GÉOTEXTILES NON TISSÉS

Présentée par: ZIANI Nekrouf

en vue de l'obtention du diplôme de: Philosophiae Doctor

a éte dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. ROLLIN André Léo, Ph.D.,	Président
M. TANGUAY Marc G., Ph.D.,	Directeur de recherche
M. LAFLEUR Jean, Ph.D.,	Co-Directeur de recherche
M. LOMBARD Gérard, Ph.D.,	Membre
M. SILVESTRI Vincent, Ph.D.,	Membre

À mes parents,

À ma famille...

REMERCIEMENTS

Quelque soit le plaisir que je puisse resentir à présenter cette thèse, je ne peux m'empêcher de remercier ici, profondément et sincèrement, tous ceux qui, de près ou de loin, se sont intéressés à cette recherche ou qui ont contribué à sa réalisation:

- Monsieur André Léo Rollin, Professeur au département de Génie Chimique, qui a bien voulu accepter de présider le jury de soutenance de ce mémoire,

- Monsieur Gérard Lombard, Directeur Technique à SAGEOS (Services-Analyses-Géosynthétiques), pour avoir été l'examinateur de cette thèse,

- Monsieur Vincent SILVESTRI, Professeur au département de Génie Civil, qui a bien voulu accepter de participer au jury de soutenance; par ailleurs, je voudrais signaler qu'il a été très disponible et très attentif chaque fois qu'une difficulté, de quelque ordre que se soit, lui était rapportée et ce durant toute la progression de ce programme de recherche,

- Messieurs Jean LAFLEUR et Marc G. TANGUAY, Professeurs aux départements de Génie Civil et de Génie Minéral, et directeurs de recherche, pour avoir dirigé et suivi l'encadrement de cette thèse; leurs commentaires et leurs remarques lors de nos différentes discussions ont été très utiles,

- Monsieur Michel Soulié, Professeur au département de Génie Civil, pour avoir été très disponible lors de nos discussions sur les aspects théoriques de cette recherche; ses conseils et suggestions ont été un apport très important pour la progression du travail réalisé,

- Monsieur Jacek Mlynarek, Directeur de SAGEOS et chargé de cours au département de Génie Civil, pour avoir beaucoup contribué à la réalisation de cette recherche; ses commentaires lors des fréquentes discussions ont été très appréciés,

- Le Gouvernement Algérien, pour m'avoir accordé une bourse d'études à l'École Polytechnique de Montréal,

- Monsieur René Phanoeuf, technicien au laboratoire de Mécanique des Sols, qui n'a ménagé aucun effort pour la réalisation des essais expérimentaux,

- Tous les professeurs et le personnel de la section Géotechnique, particulièrement M. Étienne Dégué, étudiant en Ph.D, pour ses remarques appréciées sur les aspects théoriques du mémoire,

- Enfin, je ne peux oublier mon fils Karim et ma femme qui ont bien considéré les difficultés rencontrées tout le long de ce travail; ils ont été très compréhensifs et très patients envers mon indisponibilité, ce qui a été un encouragement considérable.

SOMMAIRE

Reconnus pour leur fonction de filtration, les géotextiles non tissés sont largement utilisés dans les domaines du renforcement et du drainage des sols. Beaucoup de critères de choix de filtres ont été élaborés durant la dernière décennie et s'ils diffèrent les uns des autres et parfois même se contredisent, ils répondent tout de même aux problèmes à partir desquels ils ont été établis. Cependant, dans le cas de la filtration des suspensions où les conditions de fonctionnement des filtres sont considérées comme étant très critiques, les performances des géotextiles ne sont pas encore mises en évidence.

Dans la présente étude et après analyse des travaux réalisés dans ce domaine, une simulation de la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés à porosité très élevée (> 90 %) basée sur les probabilités de passage des particules à travers un milieu poreux permet de développer des modèles de prédiction des deux paramètres de base qui sont l'efficacité de filtration et le degré de colmatage. Aussi, cette approche a permis d'établir un modèle de prédiction de la granulométrie des passants. Ces modèles sont valides et vérifiés expérimentalement pour des concentrations initiales en particules solides des suspensions ne dépassant pas 5 g/l. Les essais de filtration sont réalisés dans un canal horizontal où le filtre géotextile est placé perpendiculairement à l'écoulement à surface libre. On montre que le paramètre de l'efficacité de filtration dépend de la structure du filtre géotextile et de la granulométrie du sol en suspension. L'étude sur le colmatage des géotextiles non tissés aiguilletés étudiés montre la différence entre le

colmatage de surface et le colmatage interne. Nous montrons que le degré de colmatage de surface dépend plus de l'ouverture de filtration des filtres géotextiles tandis que celui du colmatage interne dépend essentiellement de la concentration initiale en particules solides.

L'étude de la granulométrie des passants à travers les géotextiles a permis de confirmer l'installation d'un processus d'autofiltration observé à partir de l'analyse des variations des passants en fonction du temps. Elle a permis aussi de mettre en évidence un critère d'autofiltration pour des concentrations initiales inférieures ou égales 5 g/l.

ABSTRACT

Known for their filtration capacity, nonwoven geotextiles are widely used in soil reinforcement and drainage. During the last decade, many criteria upon which filters are chosen have been elaborated and if they differ or sometimes even contradict one another, they satisfy however, the requirements of the problem for which they have been established. However, the performance of geotextiles in the case of suspension filtration where functioning conditions of filters are considered very critical, are not yet clear.

In this study and after a review of the literature on the subject, a simulation model of suspension filtration by nonwoven geotextiles with high porosity (> 90 %) based on the probability for the particles to pass through the porous media allows to develop a prediction model based on two fundamental parameters which are filtration efficiency and clogging level. Also, this approch allowed to establish a prediction model of the size distribution of passing particles. These models have been validated and verified experimentally for initial concentration of up to 5 g/l. Filtration tests have been carried out in a horizontal flume where the geotextile filter is placed perpendicularly to the free surface flow. We found out that the filtration efficiency depends on the geotextile filter structure and on the grain size distribution of the soil in suspension. The study of the nonwoven needlepunched geotextiles clogging show the difference between the surfacial clogging and the internal clogging. We found out that the degree of surfacial clogging depends more on the filtration opening size of the geotextile filters, while the degree of

internal clogging depends essentially on the initial concentration of solid particles.

The study of the size distribution of passing particles through geotextiles allowed to confirm the installation of a self filtration process which is observed from the analysis of the variations of passing particles versus time. Also, this study allowed to developp a self filtration criterion for initial concentration up to 5 g/l.

TABLE DES MATIERES

Pages

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

SOMMAIRE vii

ABSTRACT ix

TABLE DES MATIERES xi

LISTE DES FIGURES xvii

LISTE DES TABLEAUX xxiv

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES xxvii

LISTE DES ANNEXES xxxii

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 La problématique 1

1.2 But de la recherche 3

1.3 Méthodologie appliquée 6

CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 8

2.1 Généralités 8

2.2 Définitions des caractéristiques physiques des géotextiles non tissés . . . 10

2.2.1 Masse surfacique μ_s 10

2.2.2 Épaisseur T_s 12

2.2.3 Porosité n 15

2.2.4 Diamètre des fibres d_f 17

2.2.5 Ouverture de filtration 18

2.2.5.1 Ouverture de filtration théorique 19

2.2.5.2 Ouverture de filtration expérimentale 22

2.3 Caractéristiques des suspensions sol-eau 26

2.3.1 Définition 29

2.3.2 Granulométrie des sols en suspension 30

2.3.3 Concentration en particules solides 30

2.4 Filtration des suspensions par les géotextiles 32

2.4.1 Introduction 32

2.4.2 Analyse des travaux antérieurs 35

2.5 Conclusions 80

CHAPITRE 3 MODELE DE FILTRATION DE SUSPENSIONS 83

3.1 Introduction 83

3.2 Modèle de structure 85

3.2.1 Théorie des polyèdres poissoniens 85

3.2.2 Application aux géotextiles non tissés 88

3.2.2.1 Granulométrie des pores d'une nappe élémentaire 91

3.2.2.2 Dimension des conduits des géotextiles non tissés 93

3.2.3 Influence de la porosité et de l'épaisseur sur la granulométrie des conduits des géotextiles non tissés 95

3.3 Validation du modèle théorique 98

3.3.1 Échantillonnage et critères de choix 101

3.3.2 Mesure des caractéristiques physiques des géotextiles étudiés 102

3.3.2.1 Appareillage et résultats obtenus 102

3.3.2.2 Mesure des ouvertures de filtration FOS 114

3.3.3 Vérification du modèle de structure 124

3.4 Simulation de la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés . 128

3.4.1 Probabilité de passage d'une particule 128

3.4.2 Modèles théoriques de la simulation 130

3.4.2.1 Pourcentage de passant Pa 131

3.4.2.2 Caractéristiques du sol en suspension utilisé 135

3.4.2.3 Résultats théoriques des passants et des efficacités 139

3.4.2.4 Discussion 142

3.4.2.5 Granulométrie du sol passant 146

3.4.2.6 Évaluation du colmatage théorique des géotextiles étudiés . 154

3.5 Conclusion 161

CHAPITRE 4 APPAREILLAGE ET EXPÉRIMENTATION DE L'ESSAI DE FILTRATION DE SUSPENSIONS 164

4.1 Introduction 164

4.2 Principe général 164

4.3 Appareillage de l'essai de filtration de suspensions 168

4.4 Procédures expérimentales 170

4.4.1 Description de l'essai de filtration 170

4.4.2 Débits d'écoulement 174

4.4.3 Pertes de charge 174

4.4.4 Concentrations C_u en particules solides mesurées à l'aval du géotextile 178

4.4.5 Calcul d'erreurs 181

4.4.6 Difficultés rencontrées 183

4.5 Principe de mesure du pourcentage de passants cumulés 183

4.6 Principe de mesure des granulométries 186

4.7 Principe de mesure du degré de colmatage des géotextiles 188

CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE 194

5.1 Introduction 194

5.2 Résultats et analyse des essais de filtration de suspensions 195

5.2.1 Pourcentage de passants et efficacité de filtration 196

5.2.1.1 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants et les efficacités de filtration 206

5.2.1.2 Influence de la concentration initiale sur les passants et les

efficacités de filtration 210

5.2.1.3 Influence du débit d'écoulement sur les passants et les efficacités de filtration 216

5.2.1.4 Validation du modèle théorique des passants et de l'efficacité de filtration 217

5.2.2 Granulométrie Gr(d) des passants 224

5.2.2.1 Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants 224

5.2.2.2 Influence de la concentration initiale sur les granulométries des passants 229

5.2.2.3 Validation du modèle théorique de la granulométrie Gr(d) des passants 233

5.2.3 Degrés de colmatage des géotextiles étudiés 234

5.2.3.1 Influence de l'ouverture de filtration sur le degré de colmatage des géotextiles étudiés 236

5.2.3.2 Influence de la concentration initiale C_0 sur le degré de colmatage des géotextiles étudiés 239

5.2.3.3 Validation du modèle théorique du degré de colmatage interne 247

CHAPITRE 6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 251

6.1 Conclusions 251

6.1.1 Les géotextiles étudiés 252

6.1.2 La modélisation théorique 252

6.1.3 L'expérimentation 253

6.1.4 Validation de la théorie utilisée 255

6.2 Recommandations 256

BIBLIOGRAPHIE **258**

ANNEXES **273**

LISTE DES FIGURES

Pages

FIGURE 2.1: Variation de l'ouverture de filtration en fonction de la masse surfacique (Mlynarek et al., 1993) 14

FIGURE 2.2: Variation de la porosité n en fonction de la compression pour différents géotextiles (Hussain, 1981) 16

FIGURE 2.3: Influence de la masse surfacique μ_s sur la porosité n (Gourc, 1982) 16

FIGURE 2.4: Comparaison des ouvertures de filtration théoriques et expérimentales des géotextiles non tissés (Lombard et Rollin, 1987) 25

FIGURE 2.5: Ouvertures de filtration théoriques et expérimentales des géotextiles non tissés aiguilletés (Faure, 1988) 27

FIGURE 2.6: Ouvertures de filtration théoriques et expérimenmtales des géotextiles non tissés aiguilletés (Faure, 1988) 28

FIGURE 2.7: Phénomène d'autofiltration à l'interface sol-géotextile (Faure, 1988) 34

FIGURE 2.8: Appareillage de filtration de suspensions utilisé par Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977) 37

FIGURE 2.9: Colmatage d'une nappe de textile tissée en terme de variation de vitesse en fonction du temps (Hoogendoorn et

Van-der-Meulen, 1977) 39

FIGURE 2.10: Appareillage de filtration de suspensions et granulométrie du sol utilisés par Atmatzidiz et al. (1982) 41

FIGURE 2.11: Appareillage de filtration utilisé par Mlynarek (1989) 46

FIGURE 2.12: Appareillage de filtration de suspensions utilisé par Gendrin (1991) et El-Amir (1991) 50

FIGURE 2.13: Influence des classes de sols sur les pertes de charge (Gendrin, 1991) 53

FIGURE 2.14: Influence du paramètre O/d sur les pourcentages de passants (Gendrin, 1991) 54

FIGURE 2.15: Influence de la concentration initiale en particules solides sur les pourcentages de passants (Gendrin, 1991) 56

FIGURE 2.16: Influence de la vitesse d'écoulement sur le pourcentage de passants (Gendrin, 1991) 57

FIGURE 2.17: Différentes phases de rétention des particules par les tissés (Gendrin, 1991) 58

FIGURE 2.18: Exemple montrant les différentes phases de rétention pour un tissé toile de monofilaments (Gendrin, 1991) 59

FIGURE 2.19: Effet de la concentration initiale sur les différentes phases de rétention des particules en suspensions par un géotextile tissé (Gendrin, 1991) 61

FIGURE 2.20: Modèle de rétention des particules par voûtes pyramidales

(Gendrin, 1991) 63

FIGURE 2.21: Pourcentages de passants en fonction du temps, résultats de la simulation de la filtration des suspension par un tissé (Gendrin, 1991) 66

FIGURE 2.22: Influence de la structure des géotextiles sur les pertes de charge en terme de surpression en fonction du temps (El-Amir, 1991) 69

FIGURE 2.23: Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge d'un géotextile non tissé (El-Amir, 1991) 71

FIGURE 2.24: Infuence de la concentration initiale en particules solides sur les pertes de charge (El-Amir, 1991) 72

FIGURE 2.25: Influence de la concentration initiale en particules solides sur les pourcentages de passants (El-Amir, 1991) 73

FIGURE 3.1 Réseau de droites délimitant des polygones convexes distribués aléatoirement (Gendrin, 1991) 87

FIGURE 3.2 Granulométrie des conduits en fonction de T_g (n = 0.932) . . . 96

FIGURE 3.3 Granulométrie des conduits en fonction de T_g (n = 0.85) 97

FIGURE 3.4 Granulométrie des conduits des géotextiles non tissés étudiés . . 99

FIGURE 3.5 Appareillage de mesures de l'épaisseur des géotextiles étudiés . 104

FIGURE 3.6 Variation de la masse surfacique en fonction de l'épaisseur des géotextiles étudiés 108

FIGURE 3.7: Microscope électronique à balayage JSM-820 111

FIGURE 3.8: Mesure de d_f par visualisation microscopique en plan d'un géotextile A 112

FIGURE 3.9: Mesure de d_f par visualisation microscopique en plan d'un géotextile B 113

FIGURE 3.10: Principe de fonctionnement du tamisage hydrodynamique 115

FIGURE 3.11: Appareillage de tamisage hydrodynamique 116

FIGURE 3.12: Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile A1 118

FIGURE 3.13: Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile A2 119

FIGURE 3.14: Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile A3 120

FIGURE 3.15: Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile A4 121

FIGURE 3.16: Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile B1 122

FIGURE 3.17: Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile B2 123

FIGURE 3.18: Variation de l'ouverture de filtration en fonction de la masse surfacique des géotextiles étudiés 125

FIGURE 3.19: Courbe granulométrique du sol utilisé dans les suspensions . . . 136

FIGURE 3.20: Granulométries des sols utilisés dans la simulation des essais

de filtration 138

FIGURE 3.21: Variation du pourcentage de sol passant en fonction du nombre de nappe 141

FIGURE 3.22: Principe de calcul de la granulométrie des passants 149

FIGURE 3.23: Principe de tamisage des particules de sol 150

FIGURE 3.24: Granulométries des sols filtrés obtenues par les modèles théoriques, géotextiles A 152

FIGURE 3.25: Granulométries des sols filtrés obtenues par les modèles théoriques, géotextiles B 153

FIGURE 3.26: Modèle de rétention du sol en suspension par les géotextiles A et B 155

FIGURE 4.1: Schéma de l'essai de filtration de suspensions 166

FIGURE 4.2: Appareillage de l'essai de filtration de suspensions 167

FIGURE 4.3: Variation des débits en fonction du temps, C_o = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s 175

FIGURE 4.4: Variation des débits en fonction du temps, géotextile A3, Q2 = 70 cm^3/s 176

FIGURE 4.5: Variation des débits en fonction du temps, géotextile A3, Q3 = 105 cm^3/s 177

FIGURE 4.6: Variation de C_d en fonction du temps, calcul de Pa_{max} 185

FIGURE 4.7: Principe de mesure du colmatage interne et de surface d'un géotextile en filtration de suspension 190

FIGURE 5.1: Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, C_o = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s 197

FIGURE 5.2: Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, C_o = 5 g/l, Q1 = 35 cm³/s 198

FIGURE 5.3: Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, C_o = 10 g/l, Q1 = 35 cm³/s 199

FIGURE 5.4: Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, C_o = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s 202

FIGURE 5.5: Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, C_o = 5 g/l, Q1 = 35 cm³/s 203

FIGURE 5.6: Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, C_o = 10 g/l, Q1 = 35 cm³/s 204

FIGURE 5.7: Influence de la concentration initiale C_o sur les les passants, géotextile A2, Q1 = 35 cm³/s 211

FIGURE 5.8: Influence de la concentration initiale C_o sur les passants, géotextile A4, Q1 = 35 cm³/s 212

FIGURE 5.9: Influence de la concentration initiale C_o sur les passants, géotextile A3, Q2 = 70 cm³/s 214

FIGURE 5.10: Influence de la concentration initiale C_o sur les passants, géotextile A3, Q3 = 105 cm³/s 215

FIGURE 5.11 Variation de l'efficacité de filtration en fonction de FOS/d_{90} des géotextiles A, Q1 = 35 cm³/s 222

FIGURE 5.12: Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants, géotextiles A, C_0 = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s . . 225

FIGURE 5.13: Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants, géotextiles A, C_0 = 1 g/l, Q1 = 35 cm³/s 226

FIGURE 5.14: Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants, géotextiles A, C_0 = 5 g/l, Q1 = 35 cm³/s 227

FIGURE 5.15: Comparaison entre les granulométries théoriques et expérimentales, géotextile A1, Q1 = 35 cm³/s 231

FIGURE 5.16: Comparaison entre les granulométries théoriques et expérimentales, géotextile A3, Q1 = 35 cm³/s 232

FIGURE 5.17a: Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, gâteau de sol en surface, C_0 = 0.5 g/l 240

FIGURE 5.17b: Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, colmatage interne, C_0 = 0.5 g/l 241

FIGURE 5.18a: Visualisation microscopique transversale du géotextile A2, gâteau de sol en surface, C_0 = 5 g/l 242

FIGURE 5.18b: Visualisation microscopique transversale du géotextile A2, colmatage interne, C_0 = 5 g/l 243

FIGURE 5.19a: Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, gâteau de sol en surface, C_0 = 5 g/l 244

FIGURE 5.19b: Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, colmatage interne, C_0 = 5 g/l 245

LISTE DES TABLEAUX

Pages

TABLEAU 2.1 Propriétés physiques des géotextiles non tissés testés par Rigo et al. (1990) 11

TABLEAU 2.2 Propriétés physiques des non tissés thermoliés testés par Lombard (1985) 13

TABLEAU 2.3 Granulométrie du sol utilisé par Hoogendoorn et Van Der-Meulen (1977) 36

TABLEAU 2.4 Caractéristiques physiques des géotextiles utilisés par Mlynarek (1989) 47

TABLEAU 2.5 Comparaison entre les efficacités mesurées E_{mes} par Mlynarek (1989) et les efficacités théoriques E_{th} obtenues par Ziani et al. (1993) 77

TABLEAU 2.6 Comparaison entre les efficacités mesurées E_{mes} par Gendrin (1991) et les efficacités théoriques E_{th} obtenues par Ziani et al. (1993) 77

TABLEAU 2.7 Différences relatives entre les efficacités de filtration théoriques et mesurées des géotextiles non tissés étudiés par Ziani et al. (1995) 79

TABLEAU 3.1 Ouvertures des conduits théoriques C_{95} 100

TABLEAU 3.2 Masses surfaciques des géotextiles étudiés 106

TABLEAU 3.3 Épaisseurs des géotextiles étudiés 106

TABLEAU 3.4 Caractéristiques physiques des géotextiles étudiés 109

TABLEAU 3.5 Pourcentages de passant cumulés et efficacités de filtration théoriques des géotextiles étudiés 139

TABLEAU 3.6 Influence de la porosité n du géotextile A2 sur les efficacités théoriques 143

TABLEAU 3.7 Influence de la granulométrie du sol en suspension sur les efficacités théoriques, géotextile A4 143

TABLEAU 3.8 Influence du diamètre maximum du sol en suspension sur les efficacités théoriques, géotextile A4 145

TABLEAU 3.9 Influence du diamètre minimum du sol en suspension sur les efficacités théoriques, géotextile A4 145

TABLEAU 3.10 Répartition du pourcentage de rétention de sol dans les nappes des géotextiles étudiés 156

TABLEAU 3.11 Degrés de colmatage interne théoriques (en %) des géotextiles étudiés pour différentes C_0 159

TABLEAU 4.1 Mesures obtenues sur un essai de filtration de suspensions . . . 179

TABLEAU 4.2 Pourcentages de passants mesurés de l'essai de filtration N° 4 . 187

TABLEAU 5.1 Efficacités de filtration mesurées E_{ms} des géotextiles A et B, Q1 = 35 cm³/s 209

TABLEAU 5.2 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s 219

TABLEAU 5.3 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 5 g/l, Q1 = 35 cm³/s 219

TABLEAU 5.4 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 10 g/l, Q1 = 35 cm³/s 219

TABLEAU 5.5 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales du géotextile A3, C_0 comprises entre 0.5 g/l et 5 g/l, Q2 = 70 cm³/s 223

TABLEAU 5.6 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales du géotextile A3, C_0 comprises entre 0.5 g/l et 5 g/l, Q3 = 105 cm³/s 223

TABLEAU 5.7 Degrés de colmatage interne $\Delta n/n$ et de surface T_c des géotextiles étudiés, Q1 = 35 cm³/s 237

TABLEAU 5.8 Degrés de colmatage interne théoriques $(\Delta n/n)_{th}$ et expérimentaux $(\Delta n/n)_{exp}$ des géotextiles étudiés 248

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

Lettres romaines

A_i	Géotextiles (i variant de 1 à 6)
AOS	Ouverture de filtration apparente
C, C_d	Concentration en particules solides
C_v	Concentration volumique
C_0	Concentration initiale en particules solides
COS	Conduit théorique
C_u	Coefficient d'uniformité
CV	Coefficient de variation
d, d_p, d_i	Diamètre des particules
d_{50}	Diamètre moyen des particules
D_f, d_f	Diamètre des fibres
d_H	Diamètre hydraulique
E	Efficacité de filtration
E_R	Coefficient de capture
E_{th}	Efficacité de filtration théorique
E_{mes}	Efficacité de filtration mesurée
e	Exponentielle
FOS, C_{95}, O_y, O_{95}	Ouverture de filtration des géotextiles (Filtration Opening Size)
f(T, x)	Fraction de sol de diamètre inférieur ou égal à x passant après

	un temps T
G_i	Quantité de particules
G(d)	Granulométrie des pores d'une nappe élémentaire
g(d)	Probabilité d'inscrire un cercle de diamètre d
Gr(d)	Granulométrie du passant
$Gr_0(x)$	Granulométrie initiale du sol en suspension
H	Facteur hydrodynamique
h(r)	Fonction de distribution des cercles induits par les droites d'un plan
L	Longeur de fibres
M	Masse de sol par unité de temps
Me	Masse d'une nappe élémentaire
M_f	Masse du filtre
M_0	Masse de sol initiale
M_{sg}	Masse du sol dans le géotextile
M_{sc}	Masse du sol du gâteau
M_s	Masse de sol
M_t	Masse totale mesurée de l'échantillon
M(t)	Masse de sol cumulée passée après l'intervalle de temps t
M_{Ri}	Masse de sol retenue à l'intérieur du géotextile
N	Nombre de nappes élémentaires
n	Porosité
n_f	Porosité finale

n_u	Porosité du sol à l'intérieur du géotextile
N	Nombre de nappes élémentaires
n^*	porosité de surface
n_f	Porosité finale
P	Pourcentage de passant cumulé à la fin de l'essai
Pa	Pourcentage de passant moyen cumulé théorique
Pa_{mes}	Pourcentage de passant moyen cumulé
$P_g(d)$	Probabilité pour une particule de diamètre d de traverser toute l'épaisseur du géotextile
P(r)	Distribution des cercles inscrits dans les polygônes convexes
Qi	Débit d'écoulement
Q(d)	Granulométrie des conduits de diamètre d
Re	Nombre de Reynolds
R_i	Pourcentage de retenu à l 'intérieur du géotextile
S	Paramètre de structure
T_c	Épaisseur du gâteau (ou du "cake")
T_e	Épaisseur d'une nappe élémentaire
T_g	Épaisseur des géotextiles
T_{gc}	Épaisseur du système géotextile-gâteau de sol
t	Temps
V_g	Volume du géotextile
V, V_e	Vitesse d'écoulement

V_c	Volume du gâteau (ou du "cake")
V_{Ri}	Volume de sol retenu à l'intérieur du géotextile
V_{sg}	Volume du sol dans le géotextile
V_{sc}	Volume du sol du gâteau
V_w	Volume de l'eau
V_v	Volume des vides
V'_v	Nouveau volume des vides
y(x)	Fraction de sol de diamètre x

Lettres grecques

α	Coefficient d 'absorption
ß	Compacité
ΔH	Perte de charge
Δn	Variation de la porosité
λ	Densité de la loi de poisson (densité d'implantation des droites poissoniennes)
μ_g	Masse surfacique des géotextiles
$\mu_s(t)$	Masse totale à l'instant t
$\mu_s(t, x)$	Masse de sol de diamètre x à l'instant t
ν	Viscosité cinématique
σ	Longueur spécifique de droites par unité de surface du plan

σ_N	Compression normale
σx	Écart type
ρ_f	Masse volumique des fibres
ρ_g	Masse volumique des géotextiles
ρ_m	Masse volumique des mélanges
ρ_s	Masse volumique des particules de sols
ρ_w	Masse volumique de l'eau
θ	Variable angulaire
τ_0	Rigidité initiale
λ_1	Masse linéique correspondant à 10 000 m
λ_2	Masse linéique correspondant à 1000 m
η	Viscosité dynamique
ψ	Champ de vitesse

LISTE DES ANNEXES

Pages

ANNEXES I Calcul de l'intégrale de l'équation 3.44 273

ANNEXES II Résultats expérimentaux des essais de filtration 278

ANNEXES III Variation des pertes de charge en fonction du temps 323

ANNEXES IV Variation des concentrations C_d en fonction du temps 329

ANNEXES V Variation des pourcentages de passants en fonction du temps 338

ANNEXES VI Granulométries théoriques et expérimentales 347

ANNEXES VII Mesures des degrés de colmatage des géotextiles étudiés 350

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 La problématique

La filtration des suspensions est un processus de séparation de particules dispersées d'un fluide dans lequel elles baignent. Selon l'application envisagée, ce fluide peut être un gaz, généralement de l'air, ou un liquide qui peut être entre autres, de l'eau, des boissons ou des produits pétroliers. Le processus de séparation est assuré par un milieu poreux appelé filtre. Ce dernier est considéré comme le cheval de bataille de tout processus de filtration. Sa sélection est souvent la considération la plus importante pour assurer une séparation plus efficace des particules en suspension. Selon la spécificité du problème, un bon filtre doit avoir entre autres, les caractéristiques suivantes:

- capable de retenir le plus grand nombre de particules solides de la suspension,
- offrir un minimum de résistance à l'écoulement.

Depuis les vingt dernières années, les géotextiles sont de plus en plus utilisés dans les grands travaux de génie civil et d'hydraulique. Ces matériaux textiles fibreux ont fait beaucoup de preuves dans le renforcement des chaussées de routes et de chemins de fer. Ils sont aussi très sollicités dans les systèmes de drainage. Parmi ces matériaux, on distingue les non tissés à porosité très élevée connus pour leur fonction de filtration à laquelle il faut associer les autres avantages spécifiques aux géotextiles: facilité de mise

en place, continuité de la surface, fabrication industrielle dont les caratéristiques sont bien controlées et peuvent être adaptées au besoin. Parmi la très grande variété des filtres disponibles, le choix optimal dépend des propriétés de la suspension à filtrer et des conditions spécifiques du processus de filtration. Dès lors, ces propriétés doivent être quantifiées de la manière la plus significative possible pour permettre un dimensionnement plus efficace.

Les mécanismes impliqués dans la filtration des suspensions doivent être plus clairement établis depuis que les géotextiles sont de plus en plus utilisés dans les applications environnementales impliquant la rétention des particules en suspension: barrières de silt (plus connues en anglais comme "silt fences") pour retenir l'érosion de surface, barrières dans les bassins de sédimentation ou écrans flottants pour retenir les sédiments dragués. Le principe de la notion de "silt fence" appliqué aux Etats-Unis (Richardson et Middlebrooks 1991) consiste à dresser verticalement des barrières de géotextiles afin d'arrêter au maximum les particules solides et de permettre l'évacuation d'un maximum de débit d'eau. C'est donc un problème de filtration d'une suspension sol-eau à partir d'un ruissellement, par un matériau textile fibreux. Une application à une échelle de dimension macroscopique des "silt fences" passe obligatoirement par une investigation et une étude rigoureuse des performances des géotextiles comme matériau filtrant les suspensions sol-eau.

À cause des différentes conditions aux limites, les critères usuels de sélection des filtres

géotextiles comme ceux établis dans les sols structurés ne peuvent pas être appliqués aux matériaux filtrant les suspensions. En effet, les particules arrivent individuellement au filtre et leur rétention n'est pas garantie par le phénomène de pontage qui peut se développer dans les sols structurés. Trois phénomènes peuvent se produire:

- les particules sont piégées à l'intérieur du filtre causant un colmatage tel qu'à un certain niveau la performance de filtration peut être sérieusement amoindrie, ou
- les particules sont retenues à la surface du filtre formant un gâteau (ou "cake") qui peut être similaire à celui rencontré dans la filtration industrielle, ou
- les particules peuvent passer à travers le filtre.

1.2 But de la recherche

Les performances de filtration des suspensions par les géotextiles sont évaluées à partir de deux paramètres de base qui sont l'efficacité et le colmatage. Le premier exprime le degré ou la capacité en terme de pourcentages de rétention des particules par les filtres tandis que le colmatage permet d'une part, de suivre les possibilités de filtration en terme de durée d'utilisation et d'autre part, d'évaluer le degré de colmatage des géotextiles en filtration de suspensions. Ce dernier peut être caractérisé soit par la formation d'une couche de particules à la surface du filtre plus ou moins perméable, soit par un bourrage des pores à l'intérieur de la structure du géotextile. L'estimation de l'épaisseur de la couche formée à la surface et du volume des pores occupé par les particules à l'intérieur des géotextiles permet d'évaluer respectivement le colmatage de

surface et le colmatage interne.

Ces paramètres de la filtration dépendent bien sûr des propriétés des éléments qui prennent part au processus de la filtration des suspensions. Ces éléments sont le filtre géotextile, la suspension à filtrer et les conditions d'écoulement ou de transport. Selon l'approche adoptée pour analyser l'efficacité et le colmatage des géotextiles en filtration de suspensions, la pertinence des propriétés des éléments considérés doit être bien définie. Dans le cas d'une approche hydrodynamique basée sur les phénomènes mécaniques de transport des sédiments en suspension comme ceux utilisés dans la filtration des aérosols par les milieux fibreux, il semble que les propriétés liées à l'écoulement du fluide ou de la suspension vers le filtre sont plus pertinentes. Pour le cas de la filtration de suspensions analysée à partir de cette approche, ces propriétés peuvent être entre autres, le modèle d'écoulement considéré qui décrit d'une façon adéquate le processus de la rétention des particules par les fibres. Une autre approche phénoménologique basée sur les probabilités de passage des particules peut être considérée ou envisagée pour décrire les aspects de la filtration des suspensions par les géotextiles. Dans la littérature, cette approche a été beaucoup utilisée notamment durant les dernières décennies quand elle est appliquée au géotextile soit en terme de caractérisation des structures de ces nouveaux matériaux soit en terme d'établissement de critère de choix de filtres dans les problèmes de la filtration des sols structurés. Ainsi, l'objectif de notre recherche est d'étudier les deux paramètres de base de la filtration des suspensions à partir de la simulation de la filtration par les géotextiles non

tissés établie sur la base de cette approche probabiliste, soit l'efficacité de filtration et le degré de colmatage.

Dans les fonctions de filtration, un paramètre fondamental apparaît pour caractériser les géotextiles; il s'agit de l'ouverture de filtration (FOS). Par rapport au diamètre d des particules de sol en suspension à filtrer, ce paramètre définit un critère géométrique qui permet de justifier le choix d'un filtre. Ce critère d/FOS (ou FOS/d selon son utilisation dans les modèles) à lui seul, caractérise le mécanisme de rétention des particules. La caractérisation théorique de ce paramètre d'ouverture pour les géotextiles non tissés appliquée à notre simulation de la filtration de suspensions permet d'analyser ce mécanisme de rétention en terme d'efficacité de filtration. En ce qui concerne le colmatage, on distingue d'une part la filtration des suspensions à faibles concentrations en particules solides où seulement les paramètres du filtre et des particules du sol dans la suspension comme l'ouverture de filtration, la porosité, l'épaisseur et le diamètre des particules interviennent pour décrire l'efficacité du filtre et d'autre part, le cas de filtration à fortes concentrations en particules solides où les paramètres de la concentration et du débit d'écoulement influencent l'efficacité et le degré de colmatage du filtre. La validité des modèles de l'efficacité de filtration E, du degré de colmatage et l'influence de FOS, de la concentration initiale en particules solides et du débit d'écoulement sur E constituent l'objectif principal de la présente étude.

1.3 Méthodologie appliquée

Afin d'apporter des éléments de réponse à la problématique définie ci-dessus et dans le but de clarifier l'objectif visé, le programme de recherche réalisé dans le présent mémoire est composé de trois grandes parties:

- la première partie constitue le chapitre 2; il s'agit d'une revue bibliographique traitant particulièrement une analyse et une critique des travaux réalisés antérieurement sur la filtration des suspensions par les géotextiles. Il est aussi rappelé dans ce chapitre à la fois à titre de définition et à titre de comparaison avec les travaux de l'auteur, quelques études concernant les caractéristiques des éléments prenant part au processus de la filtration. Pour les géotextiles, ces caractéristiques physiques sont liées au modèle de filtration étudié tandis que pour les suspensions il s'agit de définitions des facteurs entrant en jeu comme la granulométrie des particules solides et les propriétés rhéologiques des mélanges sol-eau en relation avec les concentrations des suspensions,

- le chapitre 3 représentant la deuxième partie, consiste en une étude théorique sur la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés. Cette étude est basée sur la simulation d'un essai de filtration utilisant une approche probabiliste de passage des particules à travers les géotextiles étudiés. Cette simulation appliquée aux non tissés aiguilletés permet de développer des modèles de prédiction de l'efficacité de filtration, de la granulométrie des passants et du colmatage des filtres étudiés.

- la troisième partie concerne l'étude expérimentale de l'auteur dont l'objectif est de vérifier et de justifier les concepts établis au chapitre 3. Cette partie est divisée en deux chapitres: le chapitre 4 présente une description de l'appareillage de l'essai de filtration utilisé dans le programme expérimental ainsi que les principes de mesure tandis que l'analyse et la discussion de tous les résultats expérimentaux obtenus sont présentées dans le chapitre 5. Ces résultats portent particulièrement sur l'influence de l'ouverture de filtration FOS, de la concentration initiale en particules solides des suspensions sur les paramètres de l'efficacité de filtration, de la granulométrie des passants et du colmatage. L'évaluation de ce dernier paramètre est complétée par des observations au microscope électronique à balayage.

Enfin, le chapitre 6 présente les conclusions et les recommandations.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Généralités

Depuis que les géotextiles sont utilisés dans les travaux de génie civil, leurs performances dans le domaine de la filtration et de la séparation des sols ont beaucoup évolué. Cette évolution est marquée surtout par l'établissement d'un nombre important de critères répondant à deux conditions qui, si elles sont formulées strictement, sont contradictoires. Un filtre doit retenir les particules de sol et permettre à l'eau de s'écouler à travers sa structure. Le rôle majeur d'un filtre placé dans un ouvrage consiste à empêcher la migration des particules de sol en contact avec le filtre. Si le milieu filtrant devait retenir toutes les particules solides, un écran imperméable serait nécessaire, auquel cas l'eau ne passerait pas au travers. Inversement, si l'eau ne devait, en aucun cas, être empêchée de s'écouler à travers le filtre, les ouvertures de ce dernier devraient être aussi larges que pratiquement aucune particule ne serait retenue. Un bon filtre doit donc avoir des ouvertures à la fois assez larges et assez petites (Giroud, 1982). C'est dans l'optique de cette philosophie qu'un grand nombre de critères a été proposé sans qu'un seul d'entre eux n'ait fait l'unanimité.

Quant à la filtration des suspensions sol-eau par les géotextiles, rien ne nous empêche de dire que, pratiquement, les performances et les limites de ces matériaux ne sont pas

encore démontrées mises à part quelques rares tentatives (Hoogendoorn et Van Der Meulen, 1977; Atmatzidis et al., 1982; Rollin, 1986; Rollin et al., 1988; Mylnarek, 1989; Faure et Gendrin, 1990; Gendrin, 1991; Montero et Overmann, 1990) dont les travaux seront analysés dans ce chapitre.

Les performances de filtration des suspensions sol-eau par les géotextiles dépendent de beaucoup de facteurs. Si, en ce qui concerne la filtration des sols, l'influence des paramètres physiques (porosité, masse surfacique, épaisseur, diamètre des fibres) et hydrauliques (perméabilité, ouverture de filtration) des géotextiles ainsi que celle des facteurs reliés aux sols (granulométrie) ont été, jusqu'à ce jour, plus ou moins bien mises en évidence, celle relative aux conditions hydrodynamiques (vitesse d'écoulement, concentration en particules solides et viscosité) de la suspension à filtrer n'est pas encore établie. Quant à la pérennité des matériaux géotextiles, c'est à dire leur comportement à long terme pour la fonction de filtration de suspensions que certains auteurs ont classé comme conditions très critiques (Gourc, 1982 et Rollin, 1986), le phénomène sera étudié sous l'aspect du colmatage.

Les paramètres de structure de ces matériaux ont été très bien étudiés par beaucoup de chercheurs notamment ceux de l'École Polytechnique de Montréal et de l'Institut de Recherches Interdisciplinaires de Grenoble. En ce qui nous concerne, ces notions sont, sinon acquises complètement, du moins assimilées en très grande partie et, par conséquent, certains travaux antérieurs les concernant ne seront que très brièvement

rappelés dans le présent ouvrage. Il s'agira surtout de la masse surfacique μ_s, l'épaisseur T_s, la porosité n, le diamètre des fibres d_f et l'ouverture de filtration FOS.

2.2 Définitions des caractéristiques physiques des géotextiles non tissés

2.2.1 Masse surfacique μ_s

Elle est définie comme étant la masse par unité de surface de géotextiles. Les travaux de Rigo et al. (1990) sur cinq types de géotextiles non tissés aiguilletés de différentes manufactures permettent d'encadrer les franges de variation de μ_s. Les tests ont été réalisés dans six laboratoires différents: Ecole Polytechnique de Montréal (Canada), Université de Liège (Belgique), Université de Grenoble (France), ENEL Milan (Italie), CEMAGREF Antony (France), Ministère des Transports et des Communications (Toronto, Canada). Les résultats de mesure sont présentés dans le tableau 2.1 où nous remarquons que les masses surfaciques μ_s sont comprises entre 130 et 580 g/m^2 pour les cinq types de géotextiles étudiés. Afin de confirmer la validité des mesures de μ_s, il faut remarquer que, dépendamment de l'épaisseur T_s, la masse surfacique augmente avec la densité des fibres ρ_f. En effet, pour une densité de fibres de 920 kg/m^3, μ_s varie de 133 à 167 g/m^2 pour une variation de T_s de 1.23 à 1.67 mm et de 259 à 434 g/m^2 pour T_s compris entre 2.23 et 3.31 mm. Pour à peu près les mêmes intervalles de T_s, la masse surfacique varie respectivement de 135 à 210 g/m^2 et de 280 à 570 g/m^2 pour une densité des fibres de 1380 kg/m^3. Ces ordres de grandeurs sont aussi observés par

Tableau 2.1 Propriétés physiques des géotextiles non tissés testés par Rigo et al. (1990)

Géotextiles	μ_g g/m²	T_μ mm	d_f µm	ρ_f kg/m³	n	FOS µm	Labo.	Sols
A1	133	1.23	25	920	0.88	118	PO	GB
A2	146	1.22	25	920	0.87	106	PO	GB
A3	167	1.67	25	920	0.89	102	PO	GB
A4	259	2.23	25	920	0.87	77	PO	GB
A5	306	2.56	25	920	0.87	76	PO	GB
A6	434	3.31	25	920	0.86	52	PO	GB
B1	135	1.25	29	1380	0.92	169	LI	S
B2	150	1.35	29	1380	0.92	130	CE	S
B3	210	1.80	29	1380	0.91	97	GR	S
B4	280	2.15	29	1380	0.91	105	CE	S
	252	2.27	29	1380	0.92	112	PO	S
B5	571	3.70	29	1380	0.89	106	PO	S
	550	4.10	29	1380	0.90	63	GR	S
B6	394	2.92	...	...	0.90	86	LI	S
C1	150	1.37	36	920	0.88	136	PO	S
	150	1.40	36	920	0.88	126	GR	S
C2	216	1.82	36	920	0.87	108	PO	S
	220	2.20	36	920	0.89	89	GR	S
C3	276	2.65	36	920	0.88	105	LI	S
	299	2.33	36	920	0.86	95	PO	S
C4	427	2.99	36	920	0.84	91	LI	S
D1	194	2.14	28	1150	0.92	107	PO	S
D2	238	2.59	28	1150	0.92	98	PO	S
D3	318	3.09	28	1150	0.91	82	PO	S
D4	310	3.17	28	1150	0.92	103	PO	GB
D5	170	2.18	28	920	0.91	118	PO	S
D6	270	2.99	28	920	0.90	88	PO	S
D7	289	3.30	28	920	0.90	80	PO	S
	293	3.23	28	920	0.90	100	PO	GB
E1	280	2.43	23	1380	0.92	103	PO	GB
E2	299	2.92	23	1380	0.93	118	PO	GB
E3	587	5.52	23	1380	0.92	95	PO	GB
E4	385	3.27	27	1380	0.91	99	PO	GB

A, B, C, D, E : Types de géotextiles non tissés aiguilletés,
PO: École Polytechnique de Montréal,
CE: CEMAGREF, Paris,
GR: Université de Grenoble,
LI: Université de Liège,
GB: Billes de verre,
S: Silice

Lombard (1985) sur des géotextiles non tissés thermoliés (tab.2.2).

La masse surfacique μ_s des géotextiles est très facile à mesurer mais son influence sur l'ouverture de filtration est bien mise en évidence (Lombard et Rollin, 1987; Rolin et al., 1990 b; Rigo et al., 1990; Faure, 1988; Mlynarek et al., 1993). En effet, plus μ_s augmente, plus l'ouverture FOS diminue (fig.2.1).

2.2.2 Epaisseur T_s

On distingue les produits plus minces qu'un demi-millimètre d'épaisseur jusqu'aux produits plus épais que 30 mm en passant par les géotextiles non tissés aiguilletés dont l'épaisseur est aux alentours de 10 mm. À cause de leur compressibilité, il est admis actuellement que les mesures des épaisseurs se font sous une pression de 2 kPa (Lombard 1985).

Rollin et al. (1990 a) montrent dans une étude sur la signification des propriétés physiques et hydrauliques sur les systèmes de drainage, que l'épaisseur T_s n'améliore pas les performances des systèmes de filtration sol-géotextiles étudiés. À partir des tests préliminaires réalisés par ces auteurs, il a été observé que le géotextile non tissé le moins épais (T_s = 0.9 mm) ayant une perméabilité égale à 2 à 3 fois celle du sol, donne une meilleure performance en terme de relation entre le débit à travers le système sol-géotextile et la charge hydraulique. Ils montrent que l'épaisseur joue un rôle insignifiant

Tableau 2.2 Propriétés physiques des non tissés thermoliés testés par Lombard (1985)

Échantillons	N°	μ_g (g/m^2)	T_g (mm)	d_f (µm)	ρ_f (kg/m^3)	n (%) (calculée)
TE5	1	76	0.493	35	910	83.1
TE7*	2	110	0.537	35	910	77.5
MI14	3	130	0.771	39	910	81.5
TE10	4	141	0.737	35	910	79.0
TE15*	5	190	0.871	35	910	76.0
TE20	6	220	1.046	35	910	76.9
TE30	7	259	1.131	35	910	74.8
MI28	8	308	1.248	39	910	72.9
TY33	11	113	0.398	39	910	68.8
TY34	12	131	0.419	39	910	65.6
LT2*	13	195	0.470	31	1380	69.9
TY36	14	205	0.539	39	910	58.2
TY38*	15	270	0.650	28	910	54.3
BI28*	20	280	2.188	28	1380	90.7

(*) Échantillons testés par Hussain (1981)

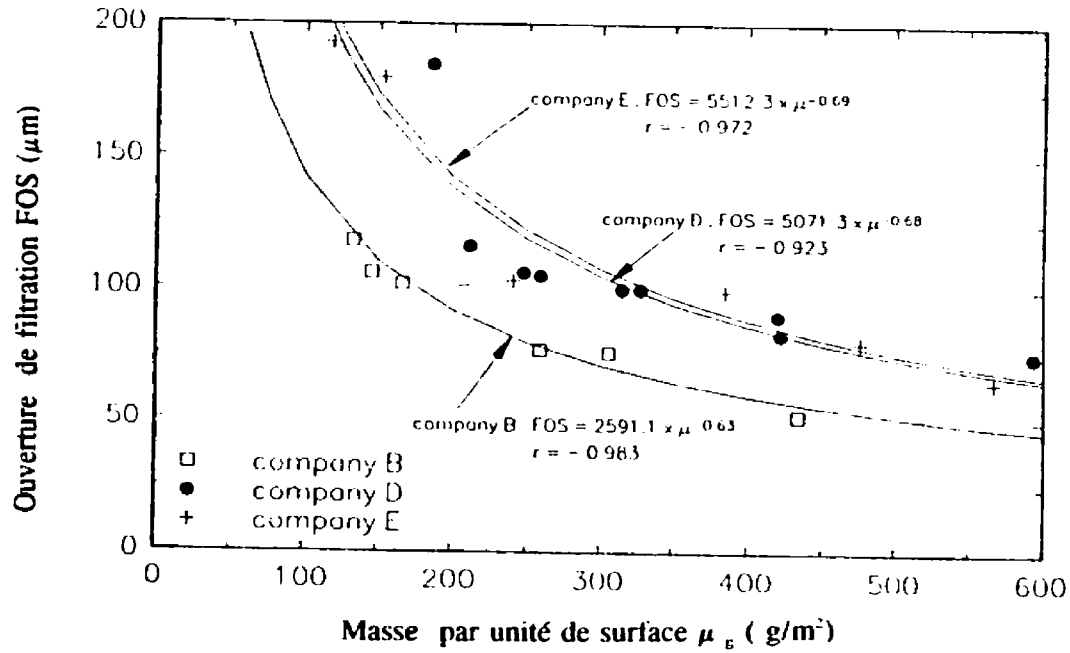


Figure 2.1 Variation de l'ouverture de filtration en fonction de la masse surfacique (Mlynarek et al., 1993)

quant au choix d'un critère de conception (rétention et perméabilité) des filtres géotextiles dans les systèmes de drainage.

2.2.3 Porosité n

La porosité est définie comme étant le rapport du volume des vides sur le volume total. Elle est fonction de l'épaisseur et de la masse surfacique par la relation suivante :

$$n = 1 - \frac{\mu_g}{\rho_f \cdot T_g} \qquad (2.1)$$

où ρ_f est la masse volumique du constituant des fibres.

Comparativement au volume des vides dans les sols, la porosité des géotextiles est très élevée et peut atteindre facilement 90 à 95 %. C'est cette caractéristique qui a permis de justifier, à priori, leur choix comme substitut aux filtres granulaires dans le domaine de la filtration et du drainage.

Il est bien évident de rappeler qu'un volume des vides dans une structure quelconque d'un milieu poreux influence l'écoulement d'un fluide en terme de perméabilité. La figure 2.2 (Hussain 1981) montre que la porosité n est fonction de la compression normale σ_N et est variable avec la structure. Les non tissés aiguilletés sont très

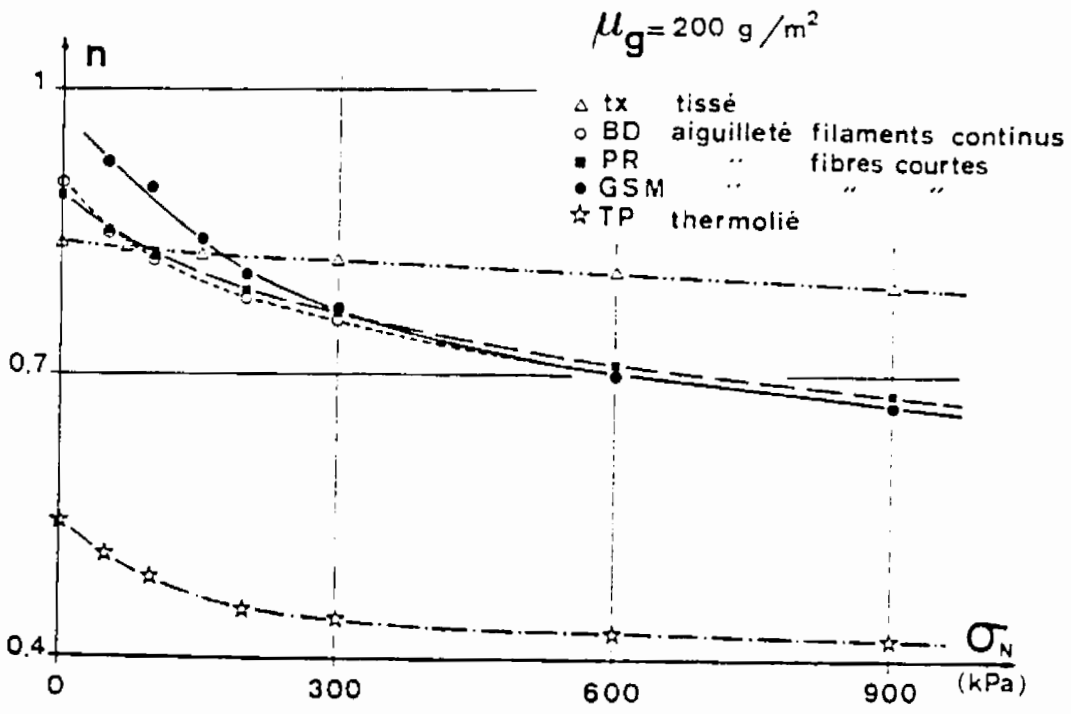


Figure 2.2 Variation de la porosité n en fonction de la compression pour différents géotextiles (Hussain, 1981)

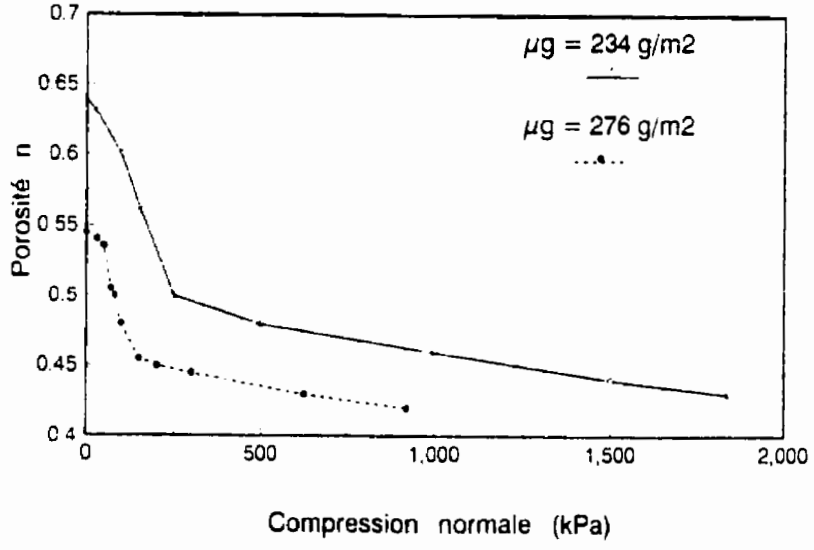


Figure 2.3 Influence de la masse surfacique μ_g sur la porosité n (Gourc, 1982)

compressibles mais leur porosité est très élevée (n > 70 %) même sous fortes compressions comparativement aux tissés et les non tissés thermoliés qui sont moins compressibles mais nettement plus poreux que les milieux granulaires. Gourc (1982) montre l'influence de la masse surfacique μ_s sur la porosité pour des géotextiles non tissés thermoliés; en effet, pour une compression normale exercée sur le géotextile, la porosité n diminue quand la masse surfacique augmente (fig.2.3).

2.2.4 Diamètre des fibres d_f

Les nappes des géotextiles sont constituées de filaments de longueur réduite (50 à 150 mm) appelés "fibres courtes" ou de fibres de grande longueur appelée "filaments continus". Les fibres ont une section généralement circulaire de diamètre d_f et sont constituées habituellement de polyester (PES), de polyamide (PA), de polypropylène (PP) ou de polyéthylène (PET). Les diamètres sont compris, souvent, entre 25 et 150 μm. Mais, généralement, les non tissés aiguilletés ont un d_f compris entre 20 et 50 μm. À noter que certains géotextiles tissés utilisés dans les applications de renforcement, peuvent avoir un d_f qui peut aller jusqu'à 5 mm, ce qui leur confère des propriétés mécaniques importantes notamment la résistance à la traction. Ce paramètre de d_f n'est pas utilisé pour la description et le choix des géotextiles (Lombard 1985); il intervient au niveau des caractéristiques de filtration (Fayoux et Evon 1982). En effet, ces derniers mettent en évidence l'influence du paramètre d_f dans le schéma théorique du modèle proposé qui prend en compte l'aspect tridimensionnel de la géométrie de passage d'une

particule. Ce modèle a été utilisé par Fayoux et Evon (1982) en vue de la prédiction de l'ouverture de filtration. Aussi, il intervient directement dans la dimension des pores. En effet, à même porosité plus le diamètre des fibres est petit, plus la longeur des fibres par unité de volume est grande et plus les pores sont petits et nombreux (Faure, 1988). Notons, à titre indicatif, que Gourc (1982) exprime le diamètre des fibres d_f en fonction de la masse linéique correspondant soit à 10 000 m ou à 1000 m de fibres et notée respectivement λ_1 et λ_2 :

$$d_f = 10^{-3} \left(\frac{400 . \lambda_1}{\pi . \rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2.2)$$

où ρ_f est la masse volumique du constituant des fibres exprimée en g/m^3 et d_f est exprimé en μm.

2.2.5 Ouverture de filtration

Le choix d'un filtre géotextile se fait en fonction de critères qui font appel à la notion d'ouverture maximale du géotextile et à la granulométrie des sols à filtrer. On définit O_y comme le diamètre d'ouverture d'un géotextile tel que y % d'ouvertures sont inférieures ou égales à O_y. Généralement, ce paramètre est noté O_f ou FOS (en anglais Filtration Opening Size) et est pris égal à O_{95}. Dans le présent mémoire, on utilise les deux notations selon leur utilisation dans le texte.

Il n'y a pas de formule théorique permettant de déterminer l'ouverture de filtration. Toutefois, des schémas théoriques basés sur la porométrie ont approché l'estimation de O_f (Fayoux et Evon, 1982; Gourc, 1982; Lombard, 1985; Faure, 1988). C'est pourquoi, d'un point de vue pratique, l'ouverture de filtration est estimée expérimentalement, quoiqu'ici il reste encore à normaliser un essai standard universel pour sa mesure.

2.2.5.1 Ouverture de filtration théorique

Le schéma théorique de Fayoux et Evon (1982), plus simple que les approches probabilistes, a l'intérêt de prendre en compte l'aspect tridimensionnel de la géométrie de passage d'une particule. Le principe de ce schéma repose sur la corrélation des mesures faites par tamisage hydrodynamique (décrit dans le chapitre 3) à deux facteurs: V, un paramètre fonction de d_f caractérisant la longueur de fibre par unité de volume et un paramètre de structure S qui dépend du schéma de répartition des fibres.

Faure (1988) estime que le modèle de Fayoux et Evon surestime l'ouverture de filtration du fait qu'il ne prend pas en compte l'empilement des schémas élémentaires dans l'épaisseur de la nappe. Ce modèle peut aussi sous-estimer l'ouverture de filtration dans la mesure où il considère les schémas élémentaires identiques à la même ouverture de filtration de chacun. Gourc (1982) introduit la notion de diamètre hydraulique d_H à partir de la perméabilité de Darcy et la compare à la distance moyenne entre fibres mesurée à l'analyseur d'images sur sections transversales:

$$d_H = \frac{n}{1 - n} d_f \qquad (2.3)$$

Lombard (1985) développe à partir des probabilités géométriques basées sur la théorie des polyèdres poissoniens (Matheron, 1971) un modèle de structure des géotextiles thermoliés. Ce modèle caractérisé par la fonction de distribution cumulative F(d) des diamètres d des pores, donne l'ouverture de filtration théorique d_{f95} tel que:

$$F(d_{f95}) = 0.95$$

avec:

$$F(d) = 1 - [(1 + \pi . \lambda . \frac{d}{2})^2 e^{-\pi . \lambda . d}]^{\frac{T_f}{2d_f}} \qquad (2.4)$$

où λ est la densité des fibres des géotextiles thermoliés égale à:

$$\lambda = \frac{8(1 - n)}{\pi^2 . d_f} \qquad (2.5)$$

Les ouvertures théoriques d_{f95} sont comparées aux ouvertures de filtration expérimentales O_{95} déterminées entre autres, par tamisage hydrodynamique (décrit ci-dessous). Lombard (1985) trouve que pour des masses surfaciques élevées donc des ouvertures plus faibles, les valeurs théoriques sont comparables aux ouvertures expérimentales avec cependant,

des différences relatives importantes variant de 10 à 30 %. Pour les thermoliés minces (masses surfaciques μ_s inférieures à environ 150 g/m^2), le modèle de F(d) sous-estime les ouvertures avec des différences relatives très importantes et supérieures à 30 %.

Faure (1988) applique la porométrie longitudinale et retient comme ouverture de filtration théorique la valeur C_{95} telle que 95 % des conduits soient de diamètre inférieur à C_{95}, c'est à dire $Q(C_{95}) = 0.95$ avec:

$$Q(d) = 1 - \left[\frac{2 + \sigma(d+d_f)}{2+\sigma . d_f}\right]^{2N} e^{-N.\sigma.d} \qquad (2.6)$$

où σ est égal à $4(1-n)/\pi d_f$, d le diamètre d'ouverture et N, le nombre de nappes élémentaires égal à T_g/d_f. Dans ce cas, l'ouverture de filtration FOS (égale à C_{95}) est solution de:

$$\left[\frac{2 + \sigma(FOS+d_f)}{2 + \sigma . d_f}\right]^{2N} e^{-N.\sigma.FOS} = 0.05 \qquad (2.7)$$

qui peut être résolue par approximations successives. Afin de caractériser la structure des géotextiles non tissés retenus dans notre programme de recherche et en vue de justifier l'approche théorique adoptée, ce modèle de Q(d) sera étudié et discuté plus en détail dans le chapitre 3.

2.2.5.2 Ouverture de filtration expérimentale

La détermination théorique de l'ouverture de filtration FOS à partir des modèles de structure et des modèles probabilistes n'est pas toujours possible à cause de la variété de nappes et du mode d'assemblage des fibres. Comme l'ouverture de filtration est liée à la dimension maximale d'une particule solide au travers de la nappe, il ne peut être que nécessaire de déterminer le FOS à partir des mesures expérimentales.

Plusieurs méthodes, toutes différentes les unes des autres, sont utilisées à travers le monde:

- AOS: Apparent Opening Size (ou EOS, Equivalent Opening Size) recommandée par l'ASTM (American Society of Testing Materials, ASTM D 4751-87),
- Delft Hydraulic Laboratory (Hollande),
- Institut de Génie Civil de Liège (Belgique),
- Franzius Institute de Hanovre (Allemagne),
- Tamisage Hydrodynamique, normalisé en France par l'AFNOR (Association Française de Normalisation, AFNOR NG 38-017) et au Canada par l'ONGC (Office des Normes Générales du Canada, CAN/CGSB-148.1-10).

Les 4 premières méthodes utilisent le tamisage avec machines vibrantes de sol ou de billes de verre de granulométries variables, à sec ou avec écoulement d'eau. Le tamisage hydrodynamique présenté par Fayoux (1977) est utilisé en particulier à l'Ecole

Polytechnique de Montréal et dans d'autres laboratoires (Grenoble, Liège et Milan). Afin d'éviter de reprendre la description détaillée de ces méthodes, nous orientons le lecteur sur les travaux de Sunjoto (1986). Cependant, quelques rappels concernant les principes d'essai nous semblent être utiles.

Dans le cas des méthodes par vibration, un milieu granulaire est tamisé pendant un certain temps par un géotextile supporté par une monture. Ce milieu peut être composé de sol ou de billes de verre. Si le sol à tamiser a une granulométrie étalée, le passant est soumis à une analyse granulométrique et l'ouverture de filtration est assimilée au diamètre caractéristique D_{95} du sol passant.

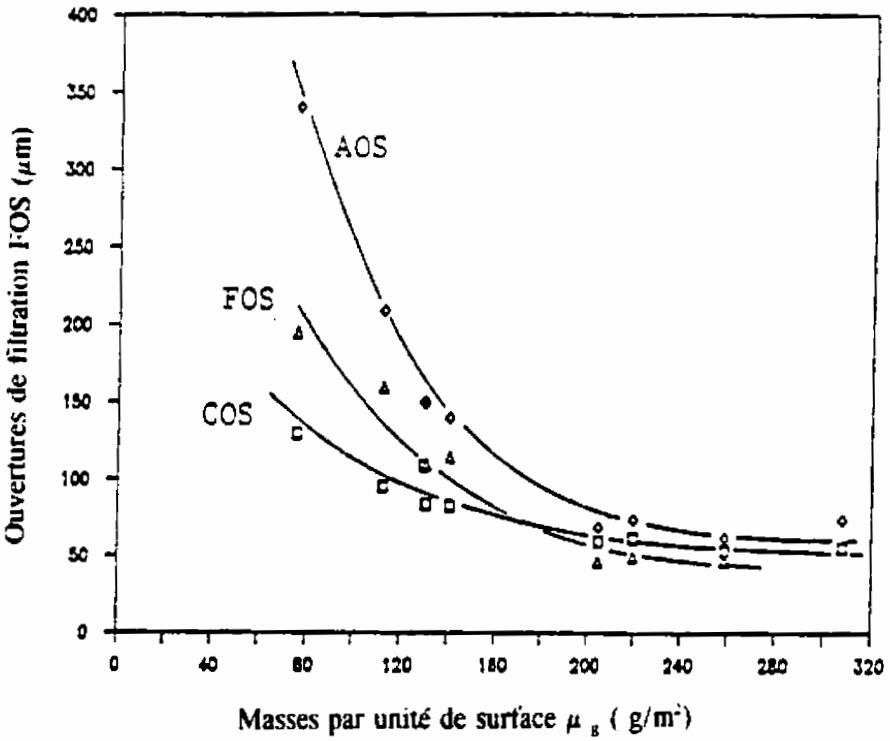
Le milieu granulaire peut être du sable dans le cas des méthodes de Delft, Liège et Hanovre tandis qu'on utilise les billes de verre aux USA (méthode AOS). Il faut noter que certaines méthodes (Liège et Hanovre) utilisent un écoulement d'eau en plus des vibrations. Il semble que l'effet de l'eau réduit ou élimine les phénomènes électrostatiques entre les grains, en particulier pour les billes de verre (Schaal 1980). Ce dernier auteur a montré qu'il y a une influence non négligeable de l'amplitude des vibrations sur l'ouverture de filtration.

En ce qui concerne la méthode du tamisage hydrodynamique, le principe de l'essai consiste en un tamisage de sol à granulométrie étalée ou un tamisage de billes de verre. L'entrainement des particules est assuré uniquement par un écoulement d'eau. Dans cette

méthode, il n'y a pas de vibrations de la monture sur laquelle est fixé le géotextile. Une fois le sol placé au fond des paniers ainsi formés, ceux-ci sont plongés dans des bacs remplis d'eau et retirés par des mouvements alternés verticaux ou rotatifs. La figure 3.11 montre une photo de montage du tamisage hydrodynamique et la description détaillée de l'appareillage est présentée au chapitre 3 (§ 3.3.2.2). Après 2000 cycles de tamisage (entre 24 et 48 heures), la granulométrie du sol passé au travers du géotextile donne l'ouverture de filtration FOS = D_{95} du passant. Mlynarek et al. (1993) pensent que l'ouverture déterminée à 500 ou 1000 cycles donnent les mêmes résultats qu'à 2000 cycles.

À l'Ecole Polytechnique de Montréal, on utilise le tamisage de billes de verre à la place du sol à granulométrie étalée. En effet, Rollin et al. (1990 b) recommandent l'utilisation des billes de verre surtout pour des ouvertures FOS inférieures à 75 μm. L'utilisation des billes de verre est justifiée par le fait qu'il n'y a pas d'agglomérations observées dans le tamisage hydrodynamique et qu'elle présente une excellente reproductibilité des résultats obtenus par le tamisage standard à sec.

La figure 2.4 montre les différences entre les ouvertures de filtration obtenues par les différentes méthodes. D'après Faure (1988), cette constatation laisse prévoir que la forme arrondie des billes de verre utilisée par la méthode AOS favorise le passage des particules les plus grosses. Les travaux de Lombard et Rollin (1987) (fig. 2.4) montrent que pour des masses surfaciques élevées (μ_s > 250 g/m^2), les ouvertures de filtration



AOS : tamisage de billes de verre, par classe, avec vibrations (Apparent Opening Size)

FOS : Tamisage hydrodynamique (Filtration Opening Size)

COS : C95 , conduit théorique (Calculated Opening size)

Figure 2.4 Comparaison des ouvertures de filtrations théoriques et expérimentales des géotextiles non tissés (Lombard et Rollin, 1987)

théoriques des non tissés thermoliés obtenues par la méthode probabiliste des polyèdres poissoniens convergent vers les ouvertures déterminées expérimentalement. Cette convergence est particulièrement marquée dans les géotextiles non tissés aiguilletés testés par tamisage hydrodynamique à 2000 cycles (Faure, 1988) (fig. 2.5 et 2.6).

Dans son étude comparative des méthodes de détermination de FOS, Sunjoto (1986) montre que les écarts obtenus entre les ouvertures de filtration sont bien moins importants que ceux obtenus par Cazzuffi et al. (1984). Les rapports sont toujours inférieurs à 2 dans le cas des travaux de Sunjoto alors qu'ils peuvent atteindre 3 entre les laboratoires de Delft, Liège ou AOS selon les travaux de Cazzuffi et al. (1984).

2.3 Caractéristiques des suspensions sol-eau

Tel que défini dans le chapitre 1, l'objectif de la présente recherche ne concerne pas l'étude des suspensions. Toutefois, on a vu que beaucoup de facteurs concernant les suspensions affectent, et c'est ce qui le caractérise d'ailleurs, le processus complexe de la filtration.

L'étude des suspensions en tant que telle est très abondante dans la littérature et dépendamment du domaine où elles interviennent, l'intérêt de l'étude sera orienté vers les besoins de la recherche en terme de paramètres pertinents. Par exemples, les mécanismes de transport de sédiments régis par les lois d'écoulement intéressent les

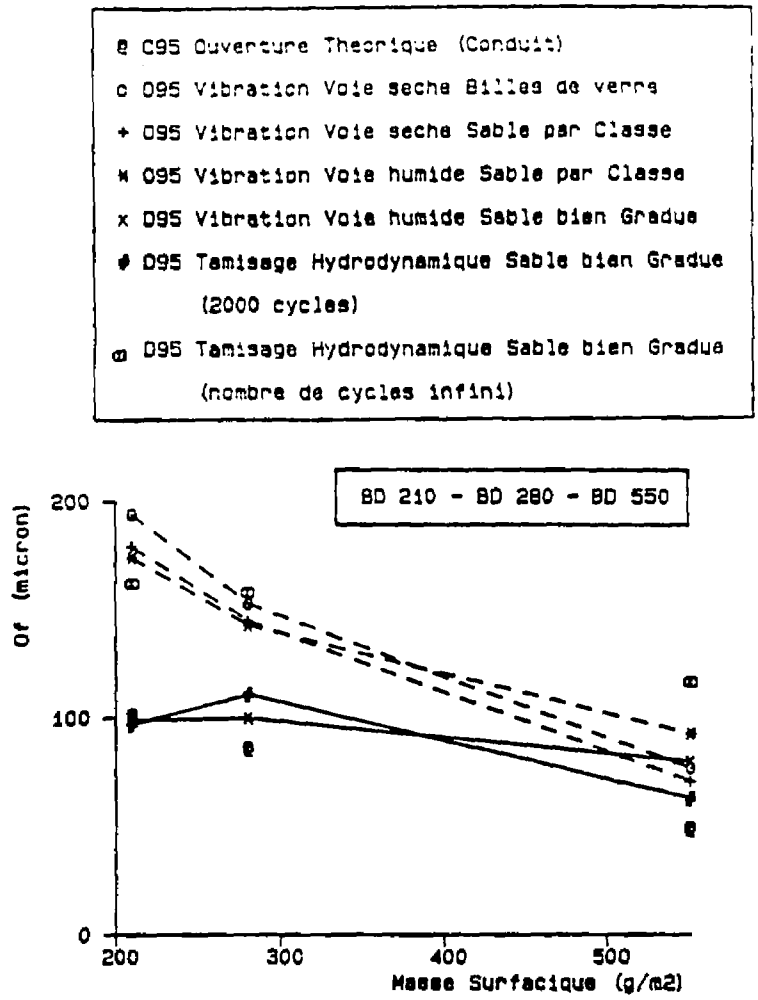
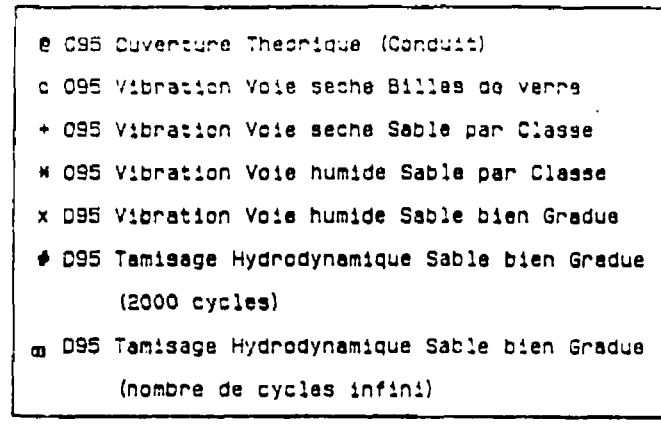


Figure 2.5 Ouvertures de filtration théoriques et expérimentales des géotextiles non tissés aiguilletés (Faure, 1988)



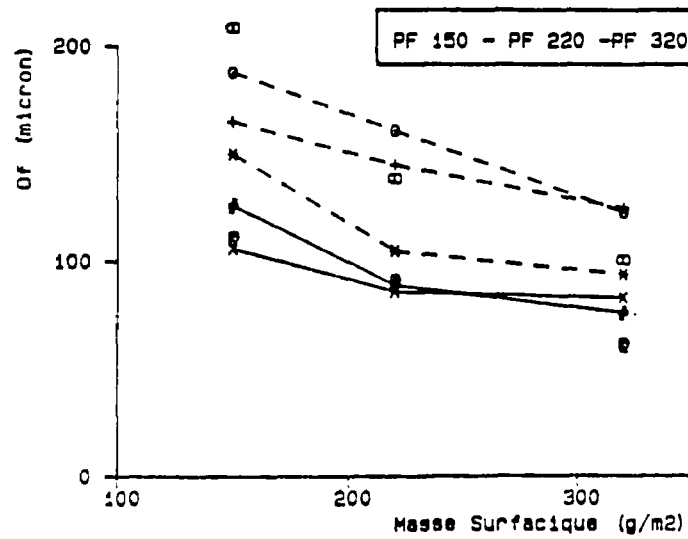


Figure 2.6 Ouvertures de filtration théoriques et expérimentales des géotextiles non tissés aiguilletés (Faure, 1988)

hydrauliciens afin de mesurer les quantités de sol transportées par l'eau; les géotechniciens et les géomorphologues étudient, entre autres, la mise en mouvement dans les suspensions des particules de sol érodées et les phénomènes de floculation qui y sont liées tandis que des facteurs comme la température, le pH, le taux de salinité caractérisent l'intérêt des chimistes.

Pour les besoins de notre recherche, l'étude bibliographique sera orientée sur quelques travaux concernant la distribution granulométrique des sols en suspension ainsi que la concentration en particules solides et son influence sur le paramètre de la viscosité des suspensions.

2.3.1 Définition

Une suspension sol-eau est un mélange composé de proportions très variables d'eau et de grains de sols dont la dimension varie, en général, de quelques microns pour les argiles à environ 100 μm pour les sables fins. Pour des concentrations en particules solides élevées, ces proportions peuvent former un ensemble ayant des propriétés visco-élastiques (Migniot, 1968). On désigne sous le nom de vases une grande variété de matériaux fins, plus ou moins cohésifs, mélangée à l'eau.

2.3.2 Granulométrie des sols en suspension

La granulométrie est la caractéristique principale des particules solides dans les suspensions sol-eau. Le plus souvent, les dimensions des particules solides sont caractérisées par le diamètre moyen d_{50}.

Ce paramètre varie dans de grandes proportions selon la nature et l'origine des sédiments. Dans les sédiments fins à fortes proportions d'argiles, le d_{50} varie de 2.8 μm pour les vases du réservoir de Sautet (France) (Parzonka, 1967) à 8.5 μm pour une suspension de la municipalité de Caplan (Québec) (Mlynarek, 1989). Les dépôts silteux-sablonneux observés dans les réservoirs d'Algérie, ont des d_{50} compris en général entre 4 et 80 μm (Ziani, 1987) avec une moyenne variant entre 30 et 40 μm.

2.3.3 Concentration en particules solides

C'est la quantité de particules solides, en volume ou en poids, par unité de volume de la suspension. Beaucoup de chercheurs ont étudié son influence sur les conditions de sédimentation dans les réservoirs et dans les cours d'eau (Migniot, 1968; Michon, 1954; Demmak, 1982; Ziani, 1987 et 1989).

L'ordre de grandeur des concentrations varie d'une région à une autre à travers le monde, en fonction des conditions climatiques locales. Au Québec, les concentrations

les plus élevées sont observées dans les cours d'eau des Basses Terres du Saint-Laurent lors de la fonte des neiges; elles varient de 0.2 à 0.4 g/l (Beaumont et al., 1989). Dans certaines régions de l'ouest canadien, elles atteignent selon ces auteurs des valeurs supérieures à 1 g/l. Ces valeurs sont très faibles par rapport à celles observées dans certains pays arides en Afrique du Nord caractérisés par des précipitations mal réparties dans le temps et dans l'espace. En Algérie, par exemple dans le bassin de l'oued El-Hammam, les concentrations moyennes varient entre 5 et 30 g/l (Ziani, 1987).

En ce qui concerne le comportement mécanique des suspensions, des études sur la viscosité montrent qu'au-delà d'une certaine concentration en particules solides, les mixtures se comportent comme des fluides non newtoniens de Bingham à deux paramètres rhéologiques: la rigidité initiale τ_0 (ou seuil de cisaillement) et la viscosité dynamique η (Michon, 1954; Parzonka, 1967). Cette concentration limite varie de 150 à 250 g/l pour les vases d'origine algérienne (Ziani, 1989) et de 130 à 445 g/l pour les mixtures du réservoir de Lubachow (Pologne) (Parzonka, 1967). En bas de ces concentrations limites, les suspensions sont des fluides newtoniens à un paramètre rhéologique η.

Rappelons que ce paramètre de la viscosité permet d'estimer avec la vitesse d'écoulement, le nombre de Reynolds Re dont les variations avec les coefficients de perte de charge caractérisent les régimes d'écoulement.

2.4 Filtration des suspensions par les géotextiles

2.4.1 Introduction

Bien que la filtration des suspensions par les géotextiles est très peu étudiée, ce type de fonction peut se rencontrer fréquemment. En effet, dans les ouvrages tels que les écrans marins et les barrières pour les silts (silt fences), les géotextiles doivent arrêter les particules en suspension dans une phase aqueuse. Ce type de situation peut se poser aussi dans le cas d'un écoulement d'eau qui peut entrainer la mise en suspension des particules de sol en mauvais contact avec les géotextiles. Il faut donc sélectionner les géotextiles capables de répondre judicieusement à ce type de fonction et capable aussi d'opérer pendant la durée requise.

À la différence des filtres de drainage où beaucoup de critères géométriques ont été établis, il faut dire que jusqu'à ce jour il n'y a pratiquement rien qui puisse orienter, encore moins d'une façon unanime, le choix d'un géotextile capable de répondre à un problème de filtration d'une suspension de sol. Très rares sont donc les travaux qui ont essayé d'apporter quelques éléments de réponse à ce type de problème et tout dépend de l'aspect sous lequel a été traité le problème. Nous citons et nous y reviendrons, les travaux de Hoogendoorn et Van Der Meulen (1977), Rollin (1986) et Atmatzidis et al. (1982) qui ont abordé le problème sous l'aspect du colmatage des structures textiles, le rapport de Mlynarek (1989) en vue de sélectionner des géotextiles pour retenir les

particules en suspension dans l'eau et les études des chercheurs de l'IRIGM (Gendrin, 1991; El-Amir, 1991). Gendrin a développé un modèle de simulation de la filtration par les géotextiles tissés d'une suspension contenant un sol pulvérulent à granulométrie étroite et El-Amir s'est intéressé à la formation du "gateau" à la surface du filtre, c'est-à-dire l'augmentation de la charge à l'amont du géotextile. Enfin, on ne peut pas se passer de citer les travaux de Ziani et al. (1993, 1995) qui ont tenté de modéliser le paramètre de l'efficacité de filtration des géotextiles non tissés aiguilletés.

Avant de décrire et d'analyser ces travaux, il nous semble utile de rappeler brièvement et à titre de définition, la notion d'autofiltration dans les systèmes de drainage où les filtres peuvent être granulaires ou synthétiques (géotextiles).

La mise en place d'un géotextile au contact d'un sol soumis à un écoulement hydraulique unidirectionnel va créer une situation instable caractérisée par une période transitoire au début du fonctionnement avec entrainement des particules de sol vers la zone de contact du filtre et avec variation de la perméabilité du système (Rollin et al., 1985 b; Lawson, 1986). Si le filtre est correctement choisi, une condition d'équilibre est atteinte après la période de transition durant laquelle les grosses particules s'appuient sur le géotextile et retiennent à leur tour les particules les plus petites: c'est le principe de l'autofiltration (fig. 2.7)

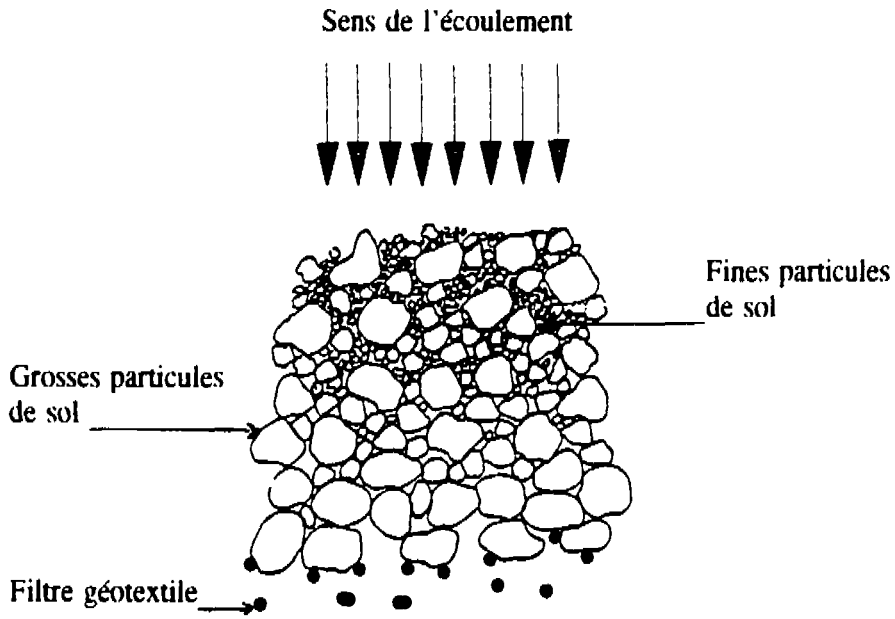


Figure 2.7 Phénomène d'autofiltration à l'interface sol-géotextile (Faure, 1988)

Ce mécanisme est observé dans la filtration des sols non cohésifs à granulométrie très étalée (coefficient d'uniformité $C_u = d_{60}/d_{10} > 6$). Pour ces sols, la forme de la courbe granulométrique de la base à filtrer ainsi que sa stabilité interne doivent être pris en compte (Lafleur et al., 1992; 1989). Ces auteurs montrent aussi que pour minimiser et le risque d'érosion et le risque de colmatage du filtre, l'ouverture de filtration FOS de ce dernier doit être choisie le plus près possible d'un diamètre significatif d_i (FOS $\approx$ d_i) qui correspond au diamètre moyen d_{50} dans le cas d'un sol à granulométrie étalée linéairement.

2.4.2 Analyse des travaux antérieurs

Comme il a été mentionné ci-dessus, très peu de travaux sur la filtration des suspensions par les géotextiles ont été réalisés, encore moins quand il s'agit d'études rigoureuses théoriques et expérimentales permettant au concepteur de mesurer les performances et les limites de ces matériaux dans ce genre de fonction. De toute la littérature liée de près ou de loin à ce domaine, nous avons essayé de faire une analyse de quelques travaux que nous avons jugés significatifs et pertinents pour notre étude. Mais avant de décrire en détails ces travaux, nous mentionnons à titre indicatif, l'approche théorique basée sur les fractales réalisée par Houi et al. (1986) pour simuler la formation d'un dépôt de particules en suspension à la surface du filtre utilisé en microfiltration. Cette étude est basée sur une modélisation statistique qui détermine la densité du dépôt en fonction d'un paramètre appelé "dimension fractale" et qui caracrérise la forme du dépôt (homogène ou hétérogène). Ces travaux s'intéressent uniquement aux caractéristiques du dépôt (ou du gâteau) comme dans les applications en filtration industrielle.

a) Travaux de Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977)

Dans une étude préliminaire sur la sensibilité au colmatage de divers types de géotextiles en filtration de suspensions, Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977) montrent que cette sensibilité augmente avec la diminution de l'ouverture des pores des filtres étudiés. Ils entendent par colmatage une diminution de la perméabilité hydraulique des géotextiles

à la suite des dépôts de particules fines à l'intérieur des filtres étudiés. Dans cette étude, seuls des géotextiles tissés ont été testés en filtration de suspensions concentrées à 1 g/l et contenant un sol (appelé silt par les auteurs) renfermant 71 % de particules argileuses inférieures à 2 μm (tab. 2.3). Les filtres utilisés sont des tissés multifilaments et des tissés à bandelettes ayant des ouvertures de filtration O_{90} comprises entre 180 et 420 μm et O_{50} comprises entre 60 et 330 μm. Ces ouvertures sont déterminées à l'aide du tamisage à sec par vibration de sable (Laboratoire Hydraulique de Delft, Hollande).

Tableau 2.3 Granulométrie du sol utilisé par Hoogendoorn et Van Der-Meulen (1977)

Diamètres des particules en μm	Poids en %
< 25	89.8
< 16	88.5
< 8	83.4
< 9	76.6
< 2	71.4

L'appareil utilisé est schématisé dans la figure 2.8. Il s'agit d'un circuit fermé où l'eau est mélangée au silt avec un mixer dans un réservoir puis refoulée à l'aide d'une pompe dans un réservoir central qui alimente le réservoir A maintenu à une charge constante. Le filtre textile est placé dans un tube de diamètre égal à 5 cm à travers duquel la suspension s'écoule. Au début de l'essai, la vitesse à travers le filtre s'ajuste de telle

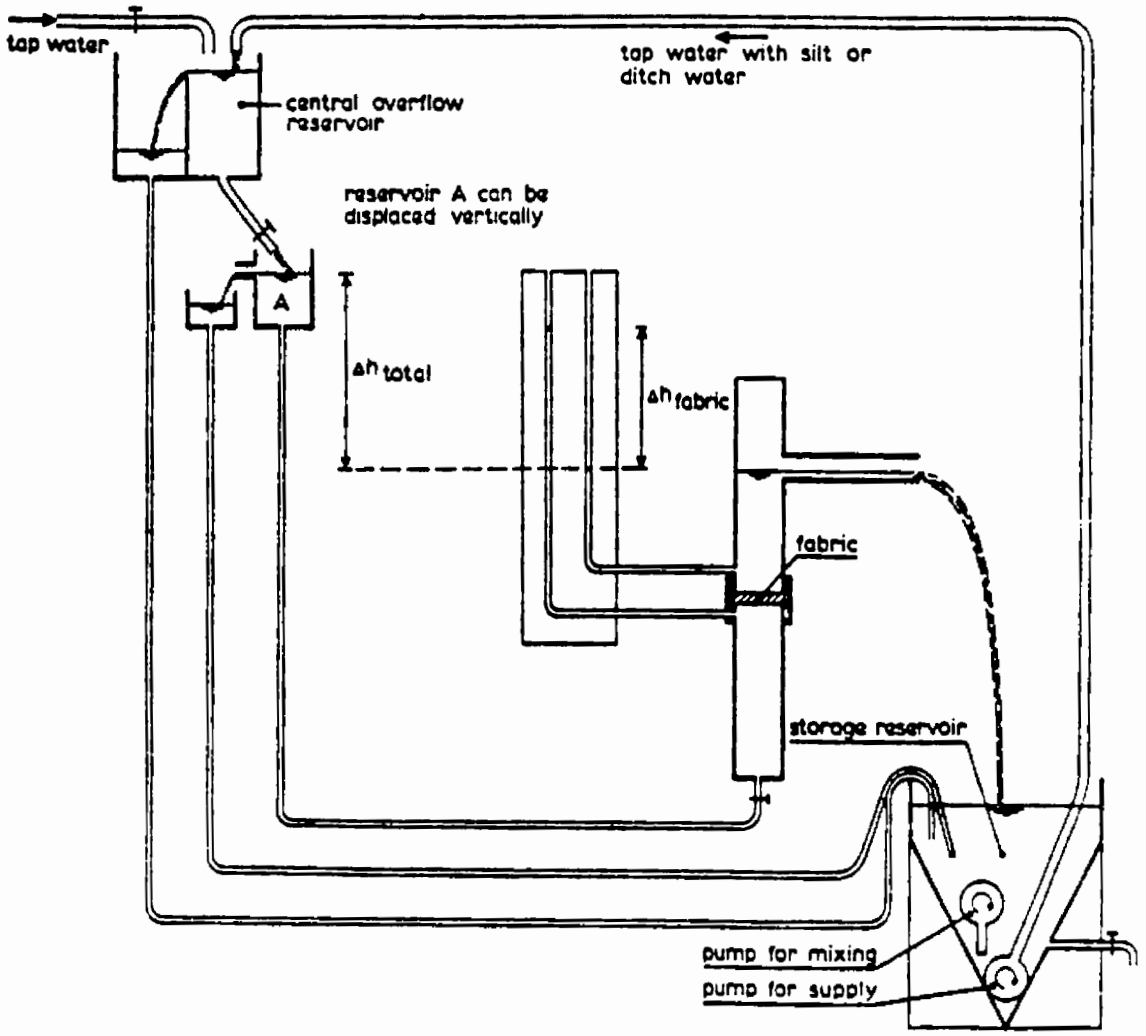


Figure 2.8 Appareillage de filtration de suspensions utilisé par Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977)

façon que la perte de charge totale dans le système est maintenue constante durant le test. Cette situation engendre une augmentation de la perte de charge à travers le géotextile; cette dernière est mesurée à l'aide de deux piézomètres et est due à la résistance hydraulique causée par le colmatage du filtre. Ainsi, le débit de la suspension recueillie à la sortie du tube et la vitesse dans le filtre diminuent avec le colmatage de la structure filtrante. Les mesures des pertes de charge et des débits à des intervalles de temps réguliers permettent de déterminer les temps t_{50} et t_{25} où la vitesse originale (environ 5 mm/s) est réduite respectivement à 50 et à 25 % de sa valeur initiale.

Le degré de colmatage est évalué par Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977) en terme de variation de la vitesse d'écoulement dans le filtre en fonction du temps (fig. 2.9) et ce pour différents rapports géométriques O_{50}/O_{90}. Les résultats de cette étude préliminaire montrent le rôle de ce paramètre géométrique sur le colmatage des géotextiles tissés. La figure 2.9 montre que le degré de colmatage croit quand O_{90} diminue et des rapports O_{50}/O_{90} plus petits font croitre la sensibilité au colmatage. Pour O_{90} = 200 μm (O_{50}/O_{90} inférieur à 0.33), la vitesse chute de 5 à 0.85 mm/s après 3 heures de filtration (fig. 2.9), ce qui correspond à une variation ou à un degré de colmatage de (5 - 0.85)/5 = 83 % alors que pour $O_{90} \geq 295$ μm, elle chute de 6 à environ 2.4 mm/s (fig. 2.9) avec un degré de colmatage de 60 %. Les auteurs de cette étude attribuent ce colmatage très élevé des géotextiles tissés dont $O_{50}/O_{90} < 0.33$ au fait que des petites valeurs de ce paramètre impliquent relativement la présence d'un grand nombre de très petites ouvertures qui sont très sensibles au colmatage. Ils concluent que selon la nature des

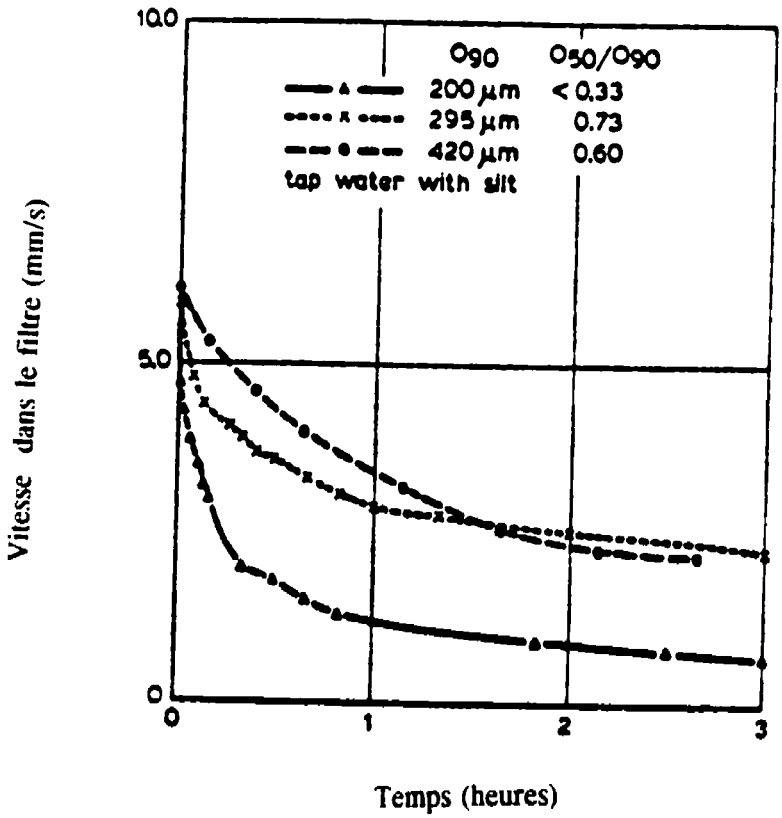


Figure 2.9 Colmatage d'une nappe de textile tissée en terme de variation de vitesse en fonction du temps (Hoogendoorn et Van-der-Meulen, 1977)

particules de sol en suspension, tous les géotextiles tissés testés sont plus ou moins sensibles au colmatage, du moins dans les conditions expérimentales étudiées, et que le degré de colmatage dépend à la fois de O_{90} et de O_{50}/O_{90}.

Cette étude est une des premières à avoir mis en évidence la susceptibilité au colmatage des géotextiles tissés, et ce, malgré des ouvertures de filtration très élevées de ces matériaux. La granulométrie du sol utilisé (tab. 2.3) montre que le diamètre moyen d_{50} est inférieur à 2 μm; ce qui donne des rapports géométriques O_{90}/d_{50} supérieurs à 100, 148 et 210 pour des O_{90} respectives de 200, 295 et 425 μm. On remarque que ce facteur géométrique est très élevé par rapport aux critères géométriques des filtres usuellement rencontrés dans les systèmes de drainage où les géotextiles sont conçus comme des filtres. Enfin, il faut signaler que dans l'étude de Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977), il n'est pas fait mention de l'influence de la granulométrie du sol en suspension ainsi que de la concentration en particules solides des suspensions utilisées.

b) Travaux de Atmatzidis et al. (1982)

Dans une étude expérimentale portant sur la description des caractéristiques de rétention et de colmatage des géotextiles en filtration de suspensions, Atmatzidis et al. (1982) utilisent un appareillage similaire (fig. 2.10) à celui de Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977) à la différence qu'une valve placée à l'aval du filtre permet de retirer à des intervalles de temps réguliers des échantillons de suspensions filtrées. La suspension

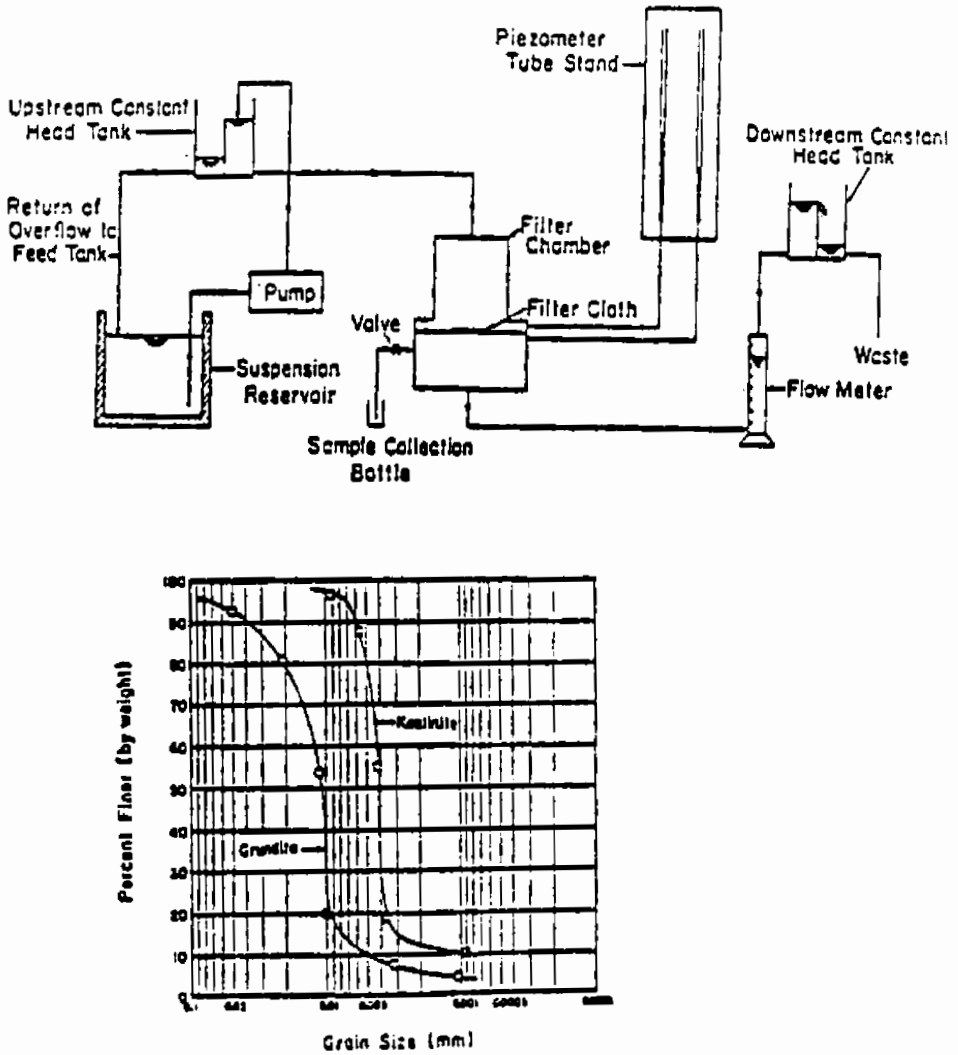


Figure 2.10 Appareillage de filtration de suspensions et granulométrie du sol utilisés par Atmatzidis et al. (1982)

préparée est pompée dans un réservoir amont maintenu à charge constante; elle est ensuite refoulée gravitairement vers un réservoir aval en passant bien sûr par une cellule où est placé le filtre géotextile. On remarque qu'à la différence des essais de Hoogendoorn et Van-der-Meulen, l'écoulement est descendant vers le bas. Les paramètres mesurés pendant l'essai sont: le débit à la sortie du filtre à l'aide d'un débit mètre, la perte de charge dans le géotextile à l'aide de deux piézomètres et les concentrations en particules solides à l'amont et à l'aval du géotextile à l'aide de prélèvements d'échantillons.

Les géotextiles testés sont deux non tissés d'ouvertures de filtration EOS égales à 180 et 150 μm et deux tissés monofilaments ayant des ouvertures de 29 et 50 μm. Les sols utilisés dans les suspensions sont des silts argileux: kaolinite et grundite (illite) ayant des diamètres moyens d_{50} respectifs de 10 et 5 μm et contenant 12 et 5 % d'argile (granulométrie de la figure 2.10). À noter que les granulométries de ces sols sont déterminées par leurs auteurs sans défloculant, ce qui ne reflète pas réellement leur distribution granulométrique. Les concentrations initiales des suspensions filtrées étaient de 1 et 10 g/l. Pour chaque test, deux types de suspensions sont utilisés: suspensions avec eau douce et suspensions avec eau salée (concentrée à 30 g/l de chlorure de sodium). Les mesures des concentrations à l'amont et à l'aval des filtres permettent d'évaluer l'efficacité de filtration (appelée efficacité de séparation ou "removal efficiency") de chaque géotextile.

Atmatzidis et al. (1982) utilisent 3 paramètres pour évaluer le colmatage ou la tendance au colmatage des géotextiles étudiés: la durée de l'essai, la réduction du débit à la sortie du filtre et la perte de charge à travers celui-ci. L'efficacité de filtration permet d'évaluer les capacités de rétention des géotextiles testés. Les auteurs de cette étude trouvent en général, que les efficacités mesurées sont faibles, variant de 2 à 29 % pour les non tissés qui montrent un meilleur comportement que les géotextiles tissés. En effet, ces derniers sont rapidement colmatés au point où même les mesures de débit, de perte de charge et de l'efficacité ne sont pas prises. Ceci a été observé par les auteurs dans tous les essais avec les tissés indépendamment du type de suspension (eau douce ou eau salée) et de la nature du sol en suspension. Ce colmatage rapide peut être dû aux faibles valeurs des ouvertures (29 et 50 μm) de ces matériaux. Avec les géotextiles non tissés, un colmatage rapide a été observé dans tous les essais avec les concentrations en particules solides de 10 g/l et contenant le sol relativement grossier (grundite). À 1 g/l, le colmatage est très retardé pour les deux géotextiles non tissés et les essais ont duré entre 2 et 7 heures. Le géotextile ayant la plus grande ouverture de filtration (EOS = 180 μm) se colmate moins rapidement et donne la plus faible perte de charge et la plus faible efficacité de filtration.

En résumé, les travaux de Atmatzidis et al. (1982) confirment les observations de Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977) concernant la très rapide tendance au colmatage des géotextiles tissés. Pour les non tissés, la filtration des suspensions à faibles concentrations en particules solides engendre une faible tendance au colmatage mais avec

des efficacités de rétention des particules plus faibles. Il faut dire que les d_{50} des sols en suspension sont faibles (10 et 5 μm) correspondant à des rapports géométriques EOS/d_{50} très grands variant de 15 à 36; ce qui explique les faibles valeurs des efficacités de filtration observées par Atmatzidis et al. (1982). Enfin, il faut rapporter que les efficacités les plus élevées relativement (entre 4 et 29 %) sont observées dans les essais de filtration de suspensions avec de l'eau salée tandis que celles avec l'eau douce sont comprises entre 2 et 19 %. Ceci est dû au fait que le sel dans les suspensions favorise les phénomènes de floculation entre les particules fines particulièrement argileuses, ce qui donne des flocons de gros diamètres qui font réduire les possibilités de passage à travers les filtres et c'est ce qui explique les efficacités relativement plus élevées.

c) Travaux de Mlynarek (1989)

En complément aux travaux de Rollin (1986) sur les mécanismes de colmatage des géotextiles, Mlynarek (1989) a essayé de sélectionner pour le compte de "Roche Environnement Limitée", les géotextiles non tissés capables de retenir les particules en suspensions dans l'eau de la municipalité de Caplan (Québec). Les conditions du système de filtration de cette municipalité sont très exigeantes au point où un filtre efficace pourrait selon Mlynarek, être conçu difficilement. En effet, ce système de filtration devait retenir entre 54 et 75 kilogrammes de sédiments en suspensions par jour. La concentration moyenne des suspensions est de l'ordre de 57 mg/l et la distribution granulométrique des sédiments montre qu'il s'agit d'un silt argileux très fin contenant

au moins 20 % de particules inférieures à 2 μm et ayant un diamètre moyen d_{50} et un diamètre maximum d_{max} respectifs de 12 et 40 μm.

Le programme expérimental de Mlynarek (1989) consiste à simuler au laboratoire les conditions in-situ du système de filtration de Caplan. Cette simulation se fait à l'aide d'un canal en plexigias d'une longueur de 1.35 m et de section tranversale de 20*20 cm^2 (fig. 2.11). L'écoulement de la suspension se fait horizontalement à travers le géotextile à tester qui sépare le canal en deux compartiments amont et aval (section 1 et 2). Dans ces derniers, deux indicateurs de niveaux sont installés afin de mesurer les pertes de charge à travers le filtre. Un déversoir situé à l'extrémité aval du canal et à une hauteur de 11.5 cm de la base, permet de mesurer les débits recueillis à la sortie du géotextile. Le sol en suspension utilisé par Mlynarek est pratiquement le même que celui rencontré in-situ avec cependant, un diamètre moyen d_{50} moins élevé et égal à 8.5 μm. Les concentrations mesurées à des intervalles de temps réguliers et à l'aide d'un turbidimètre, permettent de mesurer l'efficacité de filtration des géotextiles étudiés. Six essais de filtration de suspensions ont été réalisés sur 4 filtres géotextiles non tissés d'ouvertures de filtration FOS comprises entre 15 et 237 μm et ayant des épaisseurs T_g variant de 1.13 à 4.51 mm (tab. 2.4). Les géotextiles 1, 2 et 4 ont été testés avec des suspensions concentrées à 352 mg/l tandis que le filtre 3 l'a été avec des concentrations égales à 117, 176 et 352 mg/l.

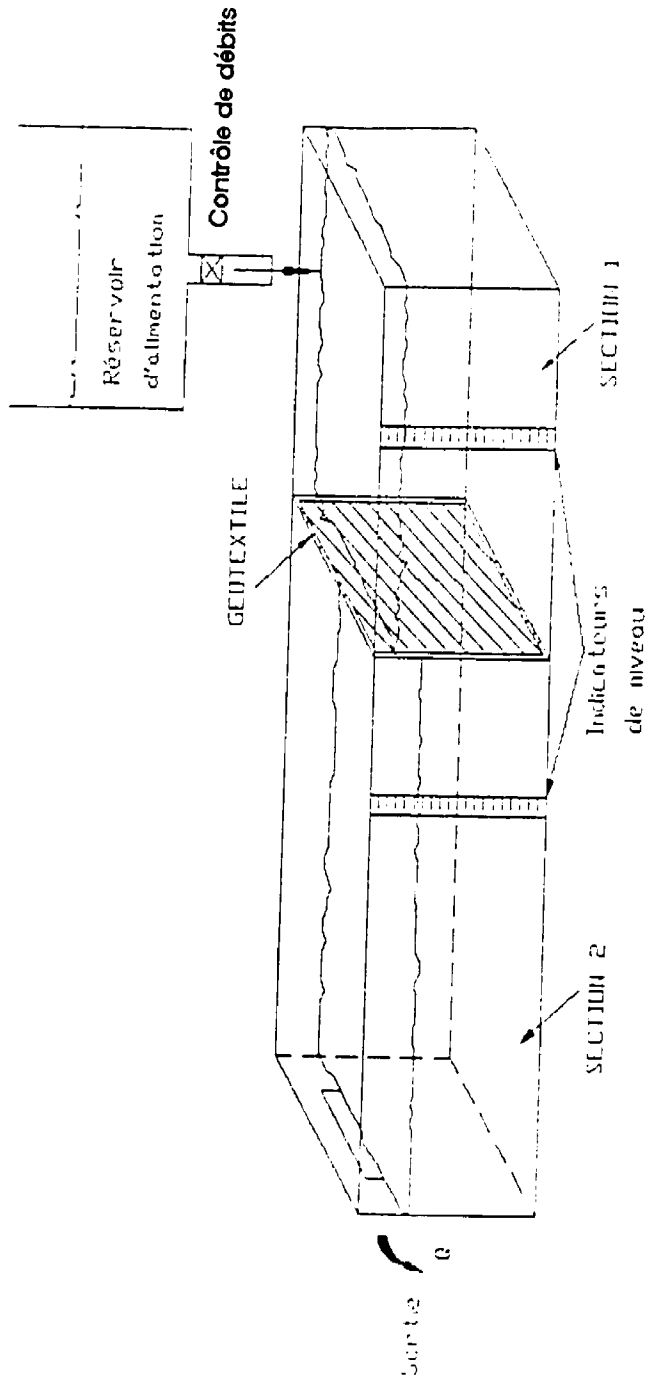


Figure 2.11 Appareillage de filtration utilisé par Mlynarek (1989)

Tableau 2.4 Caractéristiques physiques des géotextiles étudiés par Mlynarek (1989)

Géotextiles	1	2	3	4
Épaisseurs (mm)	4.51	2.66	1.13	2.40
Masses surfaciques μ_s (g/m^2)	380	300	220	260
FOS (μm)	237	61	40	15

Les résultats obtenus par Mlynarek (1989) montrent que le géotextile 4 s'est très vite colmaté à cause de son ouverture de filtration FOS très faible, soit 15 μm; une perte de charge de 55 mm est atteinte après seulement 15 minutes d'essai. Pour les géotextiles 1 et 2, Mlynarek n'observe pas d'augmentation significative de la perte de charge entre l'amont et l'aval des filtres: 1.5 à 3 mm pour le géotextile 1 et entre 3 et 6 mm pour le géotextile 2. En ce qui concerne le géotextile 3, dépendamment de la concentration initiale C_0 en particules solides, des pertes de charge importantes de 55 mm sont observées après seulement 32 min à C_0 = 352 g/l, 42 min à C_0 = 176 g/l et 125 min à C_0 = 117 g/l. Ce qui montre que le temps de colmatage est d'autant plus long que la concentration est plus basse.

En ce qui concerne les capacités de rétention c'est-à-dire l'efficacité de filtration, Mlynarek observe des valeurs variant de 20 à 95 %. Cette dernière valeur de l'efficacité est obtenue avec le géotextile 4 mais il s'agit d'une mesure après seulement 3 min d'essai puisqu'un colmatage très rapide apparaît avec ce filtre d'ouverture FOS = 15

μm. Dans les essais où le colmatage observé est faible ou très faible (géotextiles 1 et 2), Mlynarek obtient des efficacités de 24 et 29 % respectivement. En conclusion, l'auteur de cette étude pense que les géotextiles non tissés ayant des ouvertures de filtration autour de 60 μm sont appropriés pour ce type de fonction mais avec des efficacités de seulement 30 %. Cependant, le choix du géotextile doit se faire en tenant compte du fait que les pertes de charge (colmatage) et l'efficacité de filtration (rétention) soient acceptables. Enfin, l'auteur suggère pour ce genre de problèmes, qu'une série de géotextiles placés verticalement et dont les FOS vont en diminuant dans le sens de l'écoulement pourrait améliorer les résultats.

À cette limite d'ouverture de filtration FOS proposée par Mlynarek (1989) pour les géotextiles non tissés en filtration de suspensions, on rapporte les travaux très succints de Montero et Overmann (1990) qui proposent que les géotextiles non tissés aiguilletés ayant des ouvertures de filtration AOS inférieures ou égales à 150 μm sont adéquats pour filtrer des suspensions de silt sablonneux de d_{60} = 75 μm. Cette conclusion est établie à partir de l'essai de suspensions (Slurry Test) développé par Sherard et al. (1984) avec un filtre granulaire qui a été remplacé par Montero et Overmann (1990) par un filtre géotextile. Les mesures rapportées sont prises très rapidement, après seulement 60 secondes. Les résultats présentés par les auteurs ne mentionnent pas les concentrations initiales en particules solides ni les paramètres d'évaluation du colmatage que ce soit en terme de perte de charge ou en terme de réduction de vitesse ou de débit d'écoulement.

d) Travaux de Gendrin (1991)

Afin d'approcher plus particulièrement l'influence des conditions d'écoulement sur la rétention des particules, Gendrin (1991) a envisagé un programme expérimental d'essais de filtration de suspensions. L'influence de la vitesse d'écoulement, de la concentration initiale en particules solides ainsi que du rapport géométrique O/d (ou O_{95}/d_{50}) permettent à Gendrin de conclure que la rétention des particules de sol pulvérulent en suspension par les géotextiles tissés et non tissés se fait par formation de voûtes. La structure complexe des non tissés n'a pas permis à l'auteur d'étudier théoriquement le mode de rétention des particules. Cependant, les résultats expérimentaux obtenus avec ces matériaux ont permis de mettre en évidence l'influence des différents paramètres réglant la filtration des sols en suspension et les mécanismes de blocage. En ce qui concerne les géotextiles tissés et à cause de leur structure géométrique symétrique donc très précise, Gendrin (1991) simule la rétention des particules à la surface des filtres tissés basée sur la formation de voûtes.

L'expérimentation utilisée par Gendrin consiste en une cellule verticale (fig. 2.12) de diamètre efficace (diamètre de l'échantillon de filtre) égal à 50 mm soit une section de 1960 mm^2. Cette cellule est équipée d'une pompe volumétrique permettant d'avoir un débit constant durant tout l'essai. Cette pompe fait passer la suspension à filtrer d'un réservoir amont (volume d'environ 31.2 litres) équipé d'un agitateur vers le filtre géotextile. L'agitateur assure un mélange homogène et évite la sédimentation. Une

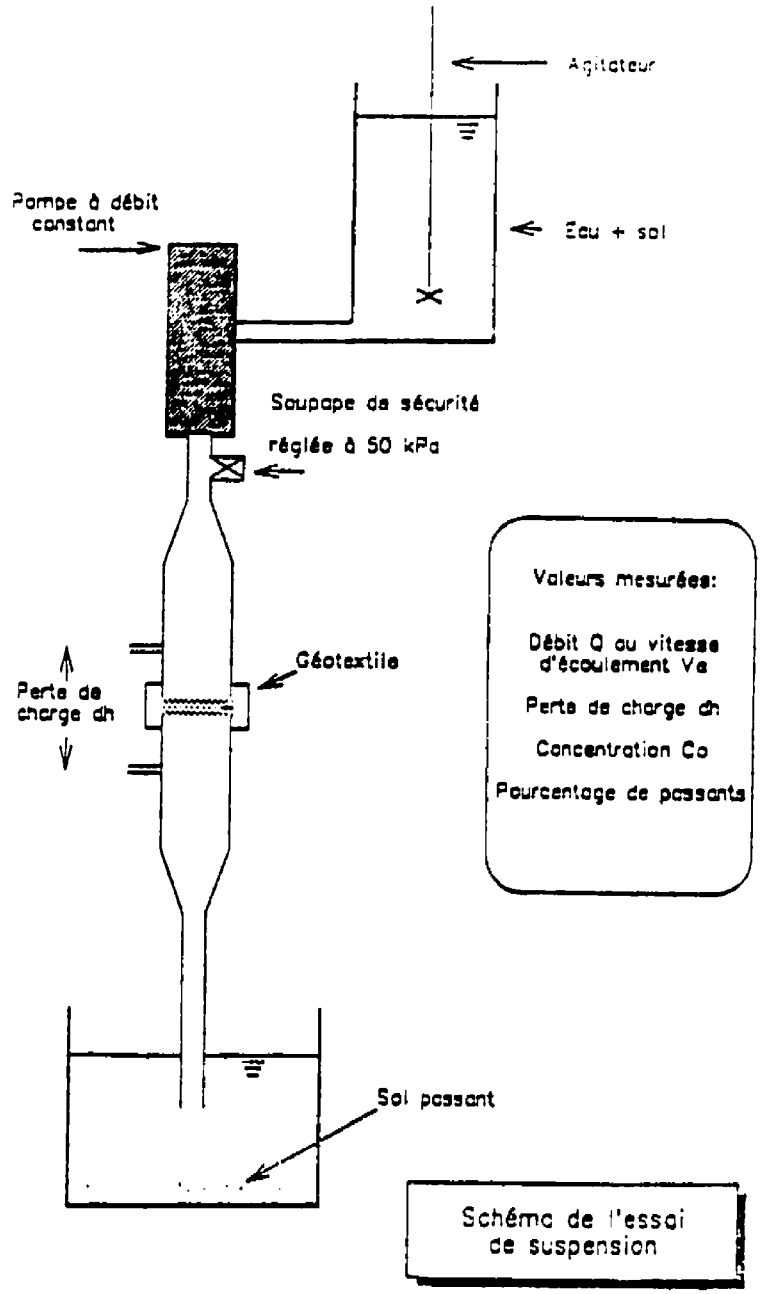


Figure 2.12 Appareillage de filtration de suspensions utilisé par Gendrin (1991) et El-Amir (1991)

soupape de sécurité réglée à 50 kPa grace à un ressort étalonné permet d'éviter d'endommager la pompe et la cellule de filtration en cas de surpression due au colmatage du filtre. Deux capteurs de pressions permettent de mesurer la perte de charge entre l'amont et l'aval du filtre. L'essai dispose d'une large plage de variation de vitesses comprises entre 30 et 70 mm/s et un peu élevées par rapport aux vitesses d'écoulement rencontrées in-situ. Trois vitesses sont utilisées par Gendrin (1991): 34, 40 et 60 mm/s; ce qui correspond à des durées d'essai comprises entre 265 et 470 secondes pour faire écouler un volume de 26 litres de suspension. Il s'agit donc d'essais très courts ne permettant peut être pas d'affiner les conclusions obtenues par Gendrin.

La suspension filtrée (filtrat) est recueillie dans un bac à l'aval du filtre après 24 h de décantation, à la suite de quoi elle est séchée à l'étuve pendant 24 h afin de mesurer la masse de sol passant à travers le géotextile. Les paramètres mesurés sont les pourcentages de passant et la perte de charge à travers le filtre. Les vitesses et les concentrations initiales C_0 en particules solides sont fixées au préalable.

Les géotextiles testés par Gendrin sont 7 non tissés (6 aiguilletés et 1 thermolié) et un tissé. Les ouvertures de filtration O_{90} varient entre 62 et 147 μm pour les non tissés tandis que le tissé est un monofilament d'ouverture égale à 1280 μm. Les sols en suspension sont des sables monoclasses de granulométrie uniforme; ce qui permet d'avoir un diamètre moyen d_{50} représentatif et significatif des différentes classes de sol et d'étudier une large gamme de variation du rapport géométrique O/d (ou O_{95}/d_{50})

variant de 0.3 à 7.5. Les concentrations initiales C_0 utilisées sont égales à: 3.2, 7.7, 19.2 et 38.4 g/l.

Une série d'essais à une vitesse de 34 mm/s, à C_0 = 3.2 g/l et utilisant différentes classes de sol en suspension a permis à Gendrin (1991) de discuter les résultats des pertes de charge observées sur les géotextiles non tissés. Dans tous les cas, il y a une augmentation de la perte de charge après seulement 3 à 4 min et les plus fortes valeurs observées sont associées aux plus petits rapports O/d; autrement dit, pour un même géotextile elles sont associées aux classes de sol les plus grosses (fig. 2.13). Il faut dire que la durée des essais de quelques minutes est très courte pour permettre à Gendrin d'affiner l'analyse de ses résultats. Néanmoins, les valeurs des pertes de charge observées montrent que les géotextiles non tissés testés dans ces conditions expérimentales, ont une tendance au colmatage très élevée. Ce que Gendrin n'interprète dans son étude qu'en terme de limitations des possibilités de mesure des capteurs de pressions placés entre l'amont et l'aval du filtre géotextile.

En terme de rétention des particules, les résultats sur les pourcentages de passant avec les géotextiles non tissés montrent une nette diminution dans le temps et ceci quelque soit O/d (fig. 2.14) et jusqu'à environ 5 à 6 min. Ensuite, l'amorce d'un palier montre une tendance à la stabilisation du filtre et ceci d'autant plus que O/d est proche de 1. Mais là aussi, la durée des essais ne permet pas de conclure qu'il n'y a pas de colmatage suite à cette stabilisation.

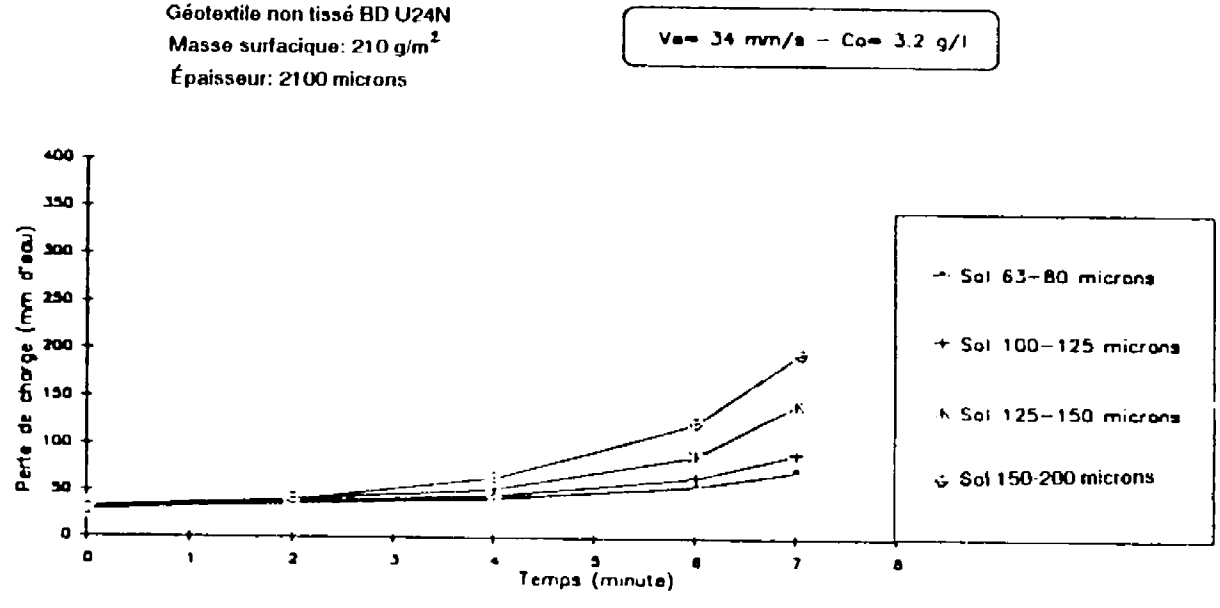


Figure 2.13 Influence des classes de sol sur les pertes de charge Gendrin(1991)

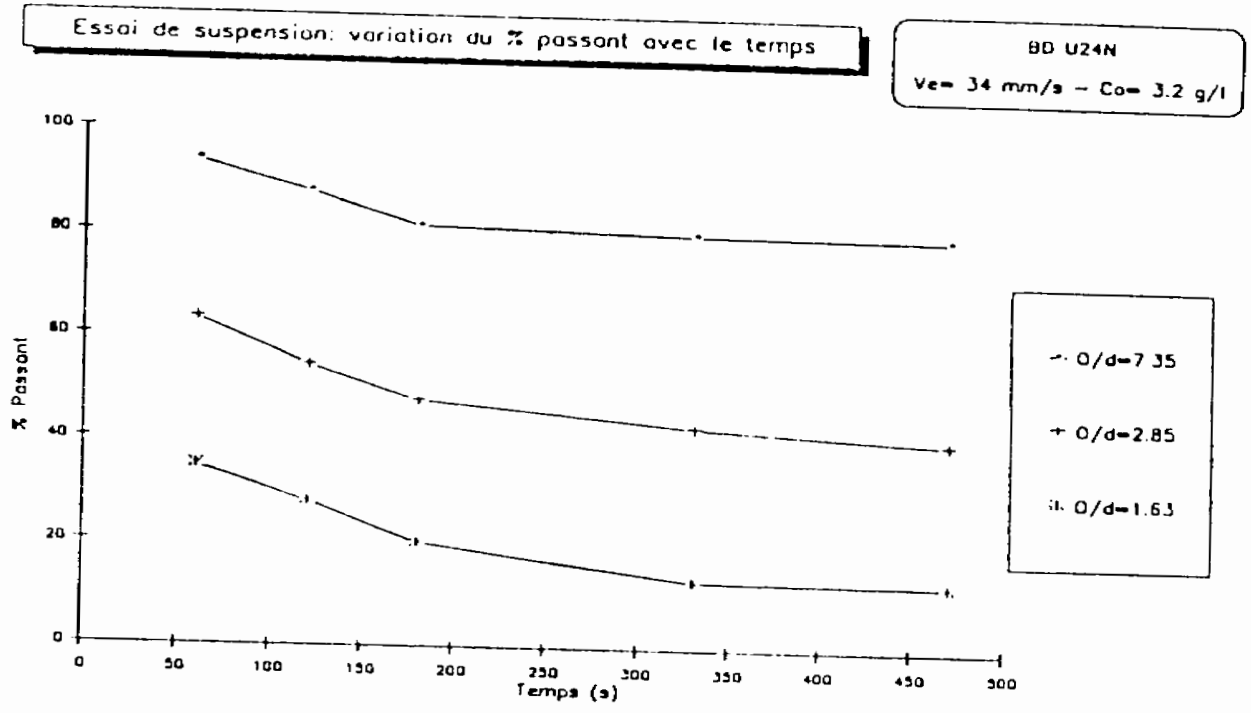


Figure 2.14 Influence du paramètre O/d sur les pourcentages de passants (Gendrin, 1991)

En ce qui concerne l'influence de la concentration initiale des suspensions sur les passants, Gendrin limite cette étude aux deux géotextiles non tissés ayant des ouvertures de filtration O_{95} égales à 126 et 147 μm et des essais à la vitesse de 60 mm/s. Il obtient qu'au delà de O/d égal à 1.7 (fig. 2.15) la concentration influence le pourcentage de passant final et que celui-ci diminue nettement quand C_0 augmente. Pour O/d proche de 1, la possibilité de passage des particules est tellement faible que la concentration C_0 ne joue qu'un rôle minime. Ceci fait conclure à Gendrin qu'à ouverture plus élevée (O/d > 3), la filtration de suspensions à fortes concentrations engendre une rétention des particules par effet de voûtes.

La figure 2.16 montre l'influence de la vitesse d'écoulement sur les passants. Gendrin pense qu'il y a une légère augmentation de passant avec la vitesse et que ceci s'explique par le fait que la formation de voûtes est plus difficile lorsque la vitesse est importante, notamment à cause des forces d'impact plus grandes des particules sur les fibres et sur d'autres particules. Les résultats de la figure 2.16 sont obtenus avec la plus faible concentration initiale en particules solides (C_0 = 3.2 g/l), donc des formations de voûtes moins nombreuses qui résistent bien à l'augmentation de la vitesse.

En ce qui concerne les passants obtenus avec le géotextile tissé toile monofilaments et dépendamment de C_0, Gendrin distingue trois phases qui caractérisent le processus de rétention (fig. 2.17 et 2.18):

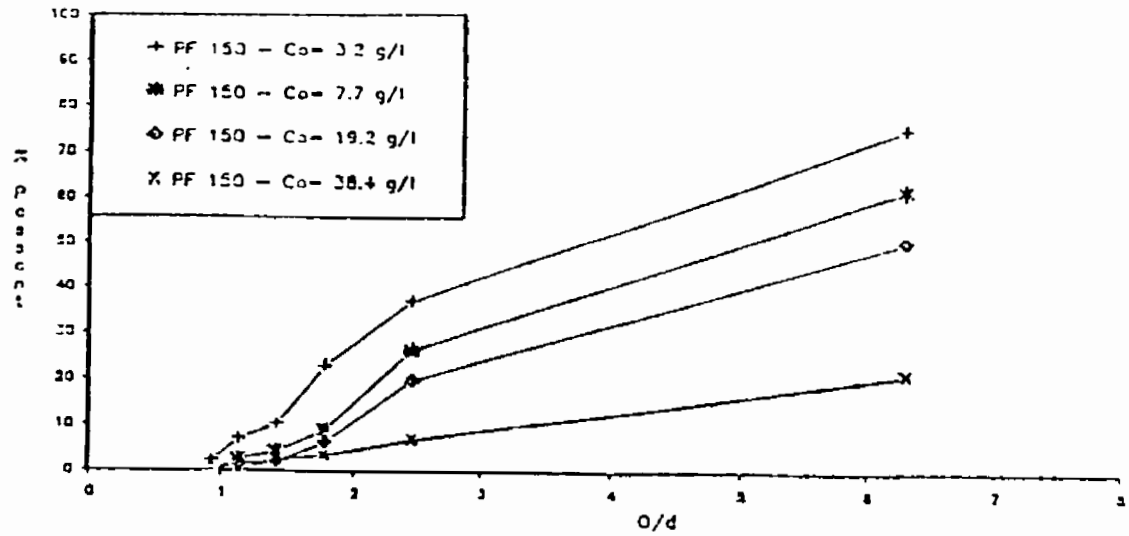


Figure 2.15 Influence de la concentration initiale en particules solides sur les pourcentages de passants (Gendrin, 1991)

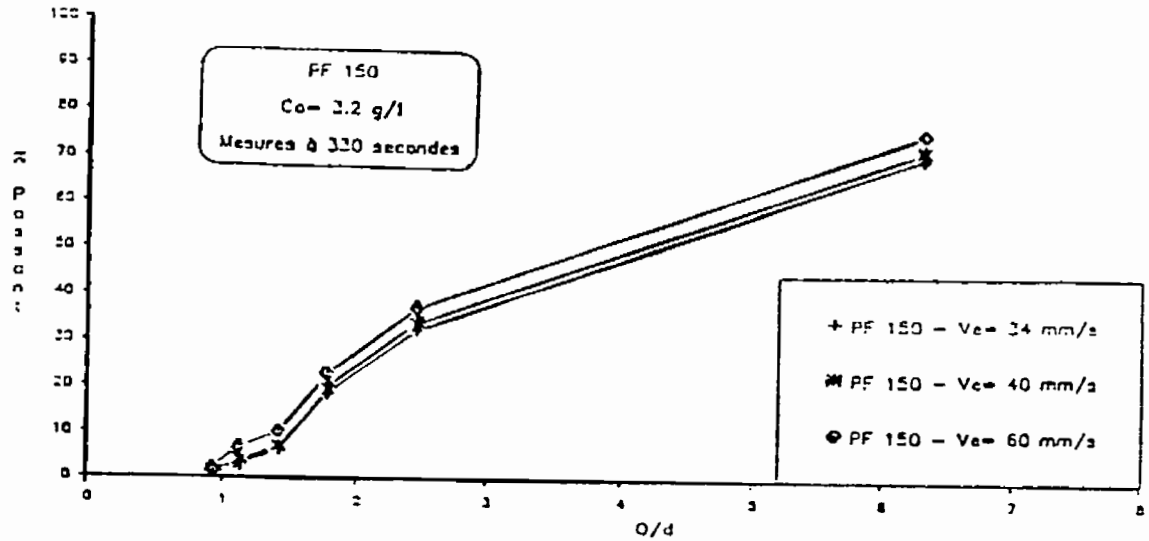


Figure 2.16 Influence de la vitesse d'écoulement sur le pourcentage de passants (Gendrin, 1991)

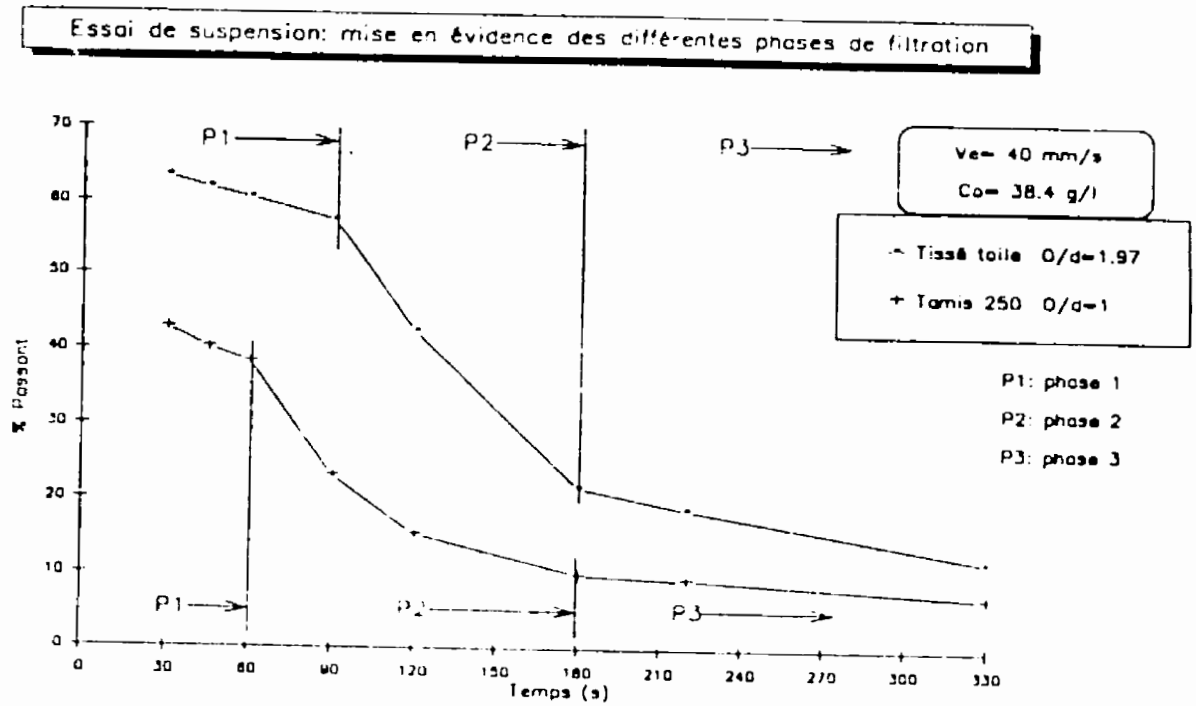


Figure 2.17 Différentes phases de rétention des particules par les tissés (Gendrin, 1991)

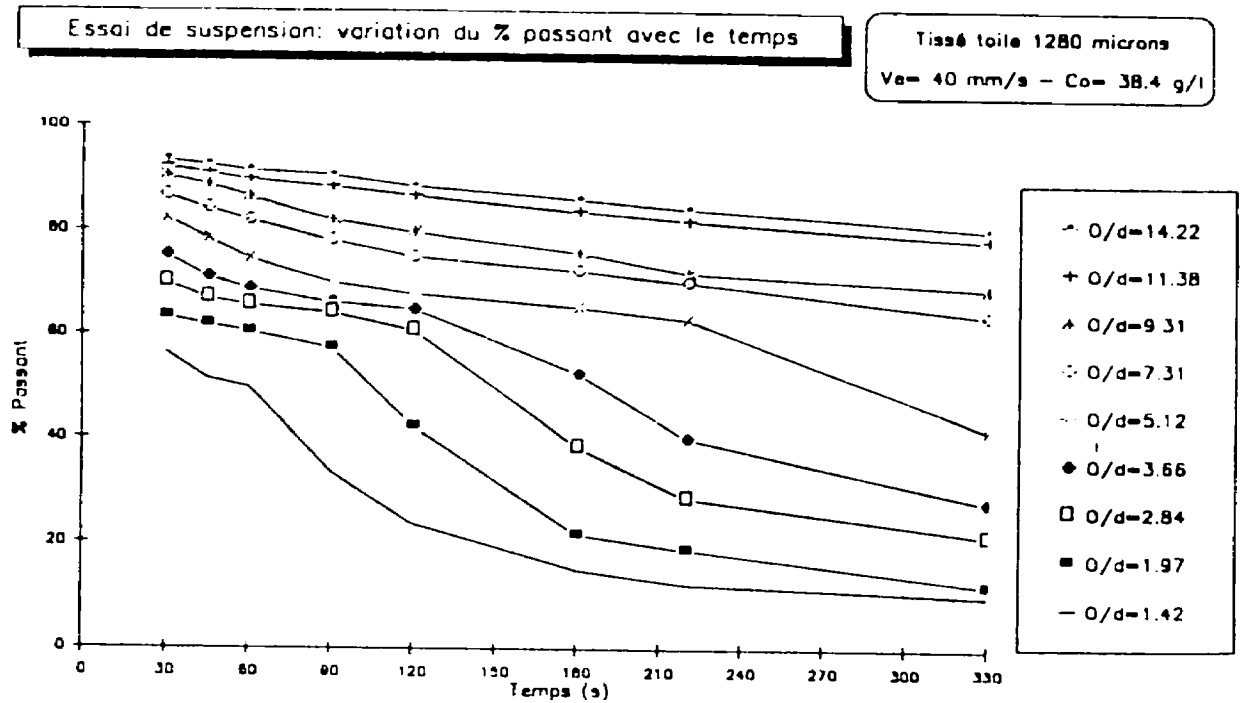


Figure 2.18 Exemple montrant les différentes phases de rétention pour un tissé toile de monofilaments (Gendrin, 1991)

- une phase P1, caractérisée par le blocage des particules sur les fibres avec quelques voûtes formées laissant encore une grande quantité de pores libres permettant le passage du sol, donc une faible diminution du passant,

- une phase P2, marquée par une formation intensive de voûtes prenant appuis à la fois sur les fibres et sur les voûtes existantes, entrainant une diminution importante de la porosité de surface et donc du passant,

- une phase P3, où la quasi totalité des pores est bloquée; seules les particules des plus petites classes de sol utilisées peuvent passer à travers les voûtes et que le pourcentage de passants continue à décroitre régulièrement.

Afin de justifier ces résultats, Gendrin réalise des essais à plus longue durée à une vitesse de 40 mm/s (22 min ou 1320 secondes, fig. 2.19); il observe alors que pour des concentrations initiales C_0 très élevées ($>$ 19.2 g/l), la dernière phase P3 conduit à un passant tendant vers 0 et non à un palier de stabilisation. Malgré un O/d élevé ($\approx$7), une forte rétention est observée à longue durée mais qu'en est-il du colmatage? Il n' y a pas eu de mesures de pertes de charge dans les essais à longue durée mais Gendrin (1991) note que la soupape de sécurité réglée à 50 kPa ne s'est pas déclenchée, d'où pas de colmatage!

L'étude des passants à travers les géotextiles tissés a permis à Gendrin (1991)

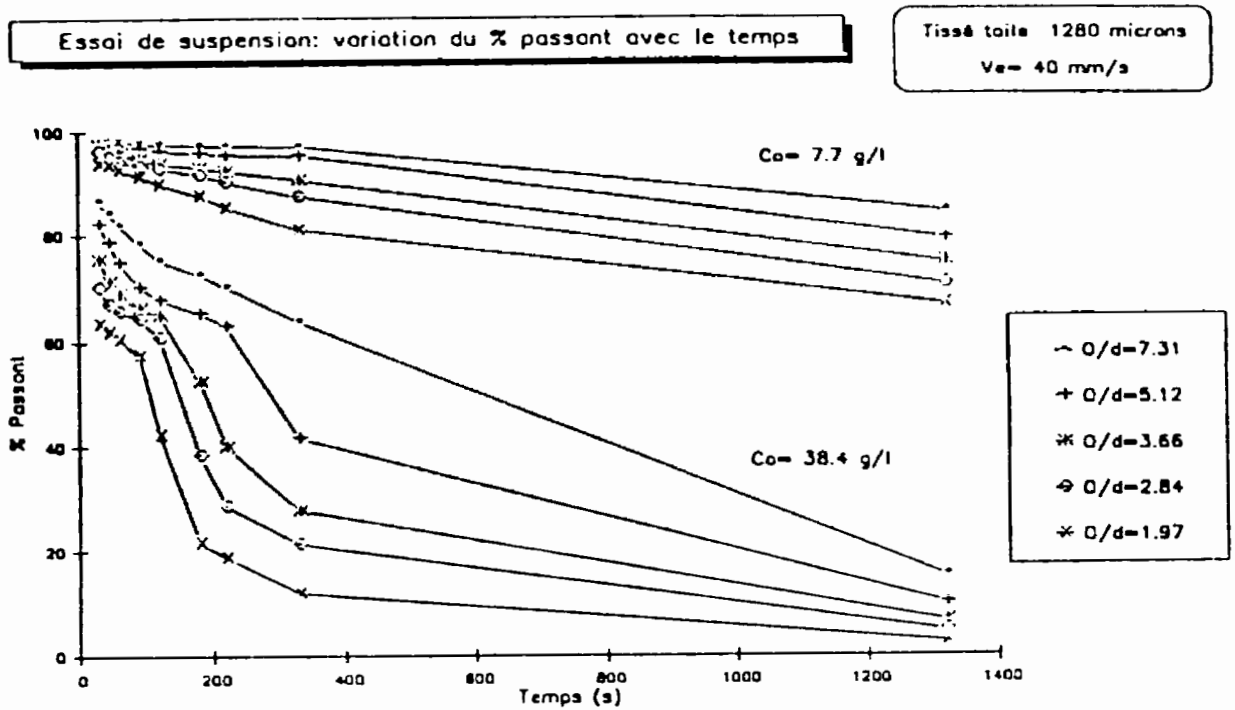


Figure 2.19 Effet de la concentration sur les différentes phases de rétention des particules en suspension par un géotextile tissé (Gendrin, 1991)

d'approcher particulièrement l'influence de la concentration en particules solides et de la vitesse d'écoulement sur la rétention des particules et de conclure que la rétention des particules à la surface des filtres géotextiles se fait par formation de voûtes. Il conclut aussi que ces dernières sont sensibles à la vitesse d'écoulement (à cause des forces d'impact des particules) mais sont d'autant plus nombreuses et stables que la concentration est élevée. Cette constatation amène Gendrin à simuler la rétention des particules en suspension par les géotextiles tissés. Cette simulation est basée sur le modèle de rétention par effet de voûtes de forme pyramidale (fig. 2.20). Cette forme permet de déterminer le nombre minimum GV de particules nécessaire à la formation d'une voûte en fonction de leur diamètre d et de la taille de la maille dm (ouverture) dans le cas des tissés à mailles carrées:

$$GV = \left(\frac{d}{2.34\,dm}\right)^{-1.7} \qquad (2.8)$$

Gendrin (1991) suppose la suspension arrivant au contact du filtre comme une succession de monocouches eau + sol ayant chacune un volume arbitraire égal au volume de la suspension s'écoulant par unité de temps. Dans ce cas, la masse e sol Pm de la monocouche (correspondant à un intervalle de temps d' une seconde) est:

$$P_m = \frac{W}{T_p} \qquad (2.9)$$

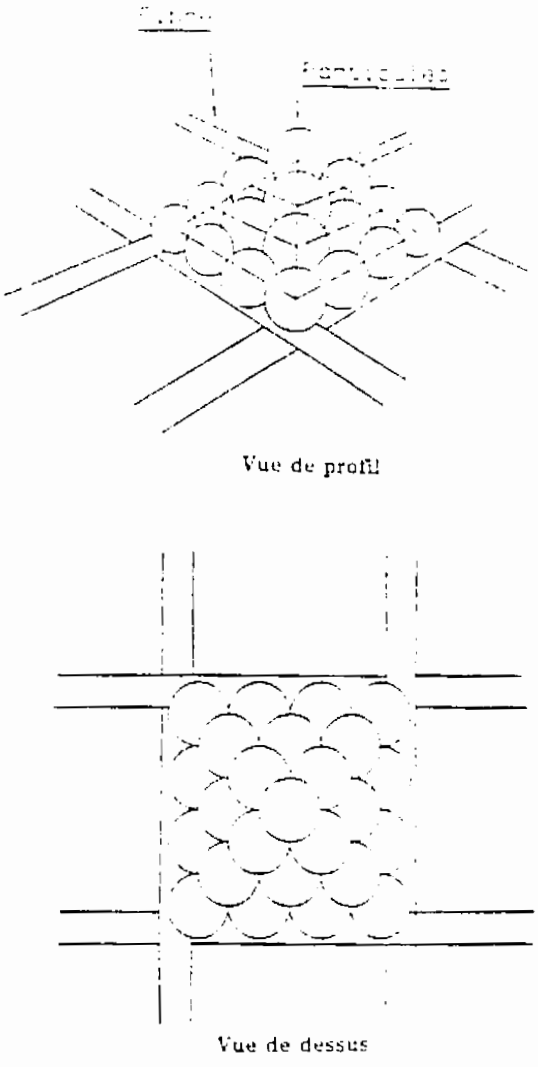


Figure 2.20 Modèle de rétention des particules par voûtes pyramidales (Gendrin, 1991)

avec W la masse de sol initiale et T_p la durée de l'essai. Si la probabilité de passage des particules de diamètre d à travers les mailles dm est P1:

$$P1 = \frac{(dm - d)^2}{(dm + d_f)^2}, \qquad si\ d < dm$$

$$et \qquad P1 = 0, \qquad si\ d \geq dm \qquad (2.10)$$

alors (1 - P1) est la probabilité de blocage (ou de rétention) de ces mêmes particules. Elle permet d'obtenir le nombre de particules retenues à chaque seconde et par conséquent le nombre de voûtes (connaissant GV) maximum pouvant être formé.

Cependant, en introduisant les paramètres de la vitesse d'écoulement, de la concentration C_0, du rapport géométrique existant entre les surfaces des mailles dm^2, le diamètre des fibres d_f et la surface projetée des particules Sp, Gendrin constate qu'il y a non uniformité de refus et il trouve nécessaire d'introduire un coefficient de réduction du nombre de voûtes possible. Ce coefficient est déterminé empiriquement en fonction de l'influence des paramètres cités ci-dessus:

$$Cr = \frac{V_e . dm^2}{Sp . C_0 . d_f . (d_f + 2d_f)} . Ke \qquad (2.11)$$

où V_e est la vitesse d'écoulement et Ke un coefficient empirique constant égal à 10^5, permettant de se recaler sur les résultats expérimentaux.

La forme pyramidale des voûtes ne permet pas aux particules d'être retenues dessus mais seulement d'être déviées vers le filtre. Le programme de simulation de Gendrin (1991) tient compte de ce refus sur voûtes déterminé par la diminution de la porosité de surface du filtre dans chaque intervalle de temps. Ce refus aura donc la possibilité de passer à l'intervalle de temps suivant en étant cumulé avec la monocouche suivante. À plus long terme (phase P3), Gendrin constate que la simulation donne un refus trop important. Il introduit donc la notion de "surplus de refus" qui est la masse maximum de sol au delà de laquelle le refus supplémentaire est remis en jeu à l'intervalle de temps suivant. Cette masse maximum par unité de surface est reliée à la masse d'une particule Pg par la relation:

$$M_u = \frac{Km}{Pg} \qquad (2.12)$$

et elle est déterminée de façon empirique par calage avec les résultats expérimentaux en introduisant un coefficient Km constant et égal à 0.7 g^2/cm^2 pour tous les essais.

Cette simulation empirique à partir des résultats expérimentaux de l'essai de filtration de suspension par les géotextiles tissés permet à Gendrin (1991) de trouver des résultats intéressants (fig. 2.21). Cependant, ces résultats ne sont rendus possibles que grace à

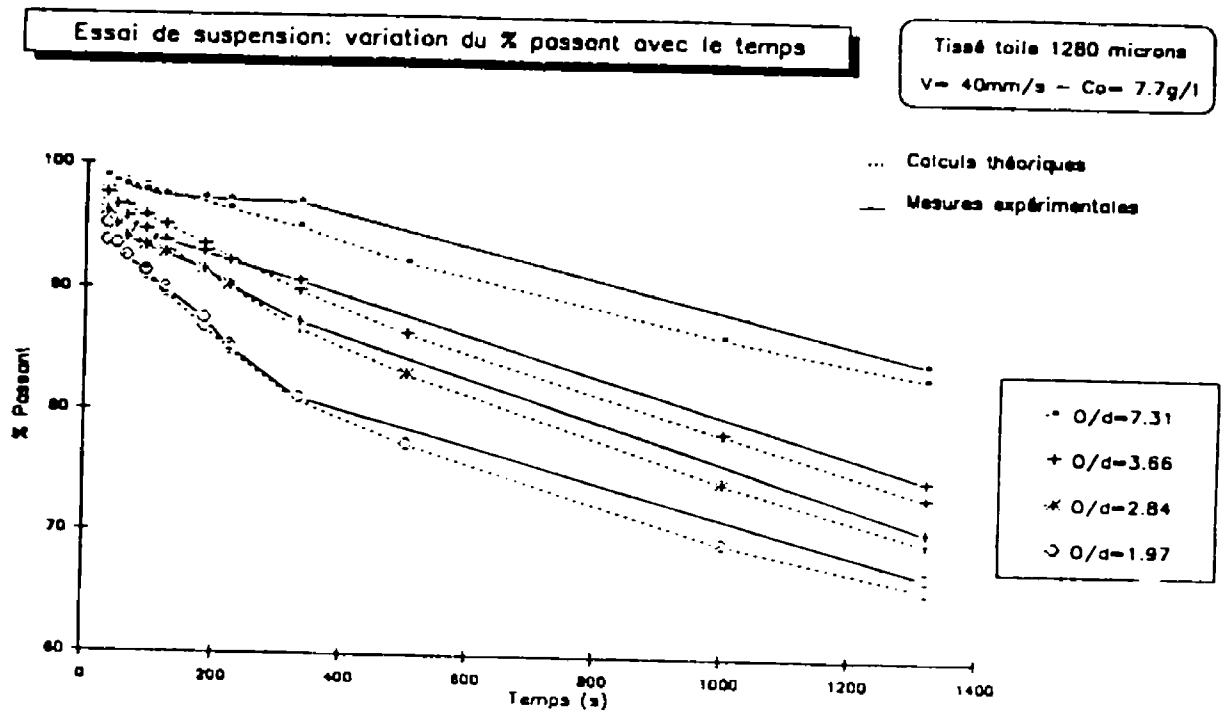


Figure 2.21 Pourcentages de passants en fonction du temps, résultats de la simulation de la filtration des suspensions par un tissé (Gendrin, 1991)

l'introduction de deux coefficients empiriques Ke et Km dont les valeurs constantes quel que soit le géotextile tissé, la vitesse d'écoulement Ve ou la concentration C_0, laissent à penser qu'ils ont bien une réalité physique dans l'essai de suspension. Mais Gendrin n'a pu encore les relier aux différents paramètres de l'essai.

e) Travaux de El-Amir (1991)

Avec le même appareilage utilisé à l'IRIGM de Grenoble et contrairement aux travaux de Gendrin (1991), El-Amir (1991) s'intéresse plus au risque de colmatage qu'à la rétention des particules en suspension par les géotextiles tissés et non tissés. L'auteur étudie le colmatage en terme d'augmentation de la surpression à l'amont du filtre dans la cellule de filtration (fig 2.12). Les sols utilisés par El-Amir (1991) sont des silts argileux de granulométrie très étalée: une argile de Bresse contenant 50 % de particules de diamètre inférieur à 2 μm (d_{50} = 2 μm) et ayant un diamètre maximum d_{max} égal à 120 μm et des fractions de sol silteuses argileuses de diamètres moyens d_{50} variant de 6.5 à 18 μm. Ces fractions de sol sont caractérisées par des diamètres maximum variant entre 40 et 700 μm et contenant donc une fraction de sol sablonneuse (d > 75 μm) plus ou moins importante. Les géotextiles testés sont 4 non tissés (3 aiguilletés et 1 thermolié) d'ouvertures de filtration O_{95} comprises entre 89 et 135 μm et 2 tissés: un monofilament d'ouverture égale à 122 μm et un tissé de bandelettes d'ouverture 104 μm. En ce qui concerne les concentrations en particules solides des suspensions filtrées, El-Amir utilise 2 séries dépendamment de la granulométrie du sol: une série à C_0 = 1, 2,

4 et 8 g/l pour une suspension de sol très fin (d_{max} < 40 μm) et une série à C_0 = 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 et 1 g/l pour les autres sols.

Les résultats obtenus par El-Amir (1991) montrent que les géotextiles tissés et non tissés se comportent différemment selon que le sol est pulvérulent ou cohérent. Le premier passe à travers les géotextiles même avec des concentrations initiales très élevées (C_0 = 38.2 g/l) et l'essai dure assez longtemps sans surpression importante (Gendrin, 1991) du fait selon El-Amir, de la forte perméabilité des sols pulvérulents. Pour les sols cohérents, El-Amir observe qu'une rétention des particules par le filtre a lieu rapidement entrainant une formation d'un "gâteau" de sol sur l'éprouvette, même avec des concentrations relativement faibles ($C_0 \leq$ 1 g/l) et qu'une fois la surpression à l'amont du géotextile testé atteint 5 à 10 kPa, elle augmente brusquement jusqu'à colmatage complet (fig. 2.22).

Dans la figure 2.22, El-Amir (1991) présente l'évolution en fonction du temps de la surpression pour 4 types de géotextiles de structure différente. Ayant des ouvertures de filtration O_{95} sensiblement les mêmes (entre 104 et 126 μm), les géotextiles testés montrent des comportements différents. Les filtres tissé à bandelettes (AM320) et non tissé TP136 thermolié présentent un risque au colmatage très élevé. Tandis que le non tissé aiguilleté PF150 se caractérise par un retard au colmatage régulier dans tous les essais. Ce qui n'est pas expliqué dans la thèse de El-Amir (1991) c'est le comportement du géotextile tissé monofilament TP48 qui entraine une très faible surpression donc un

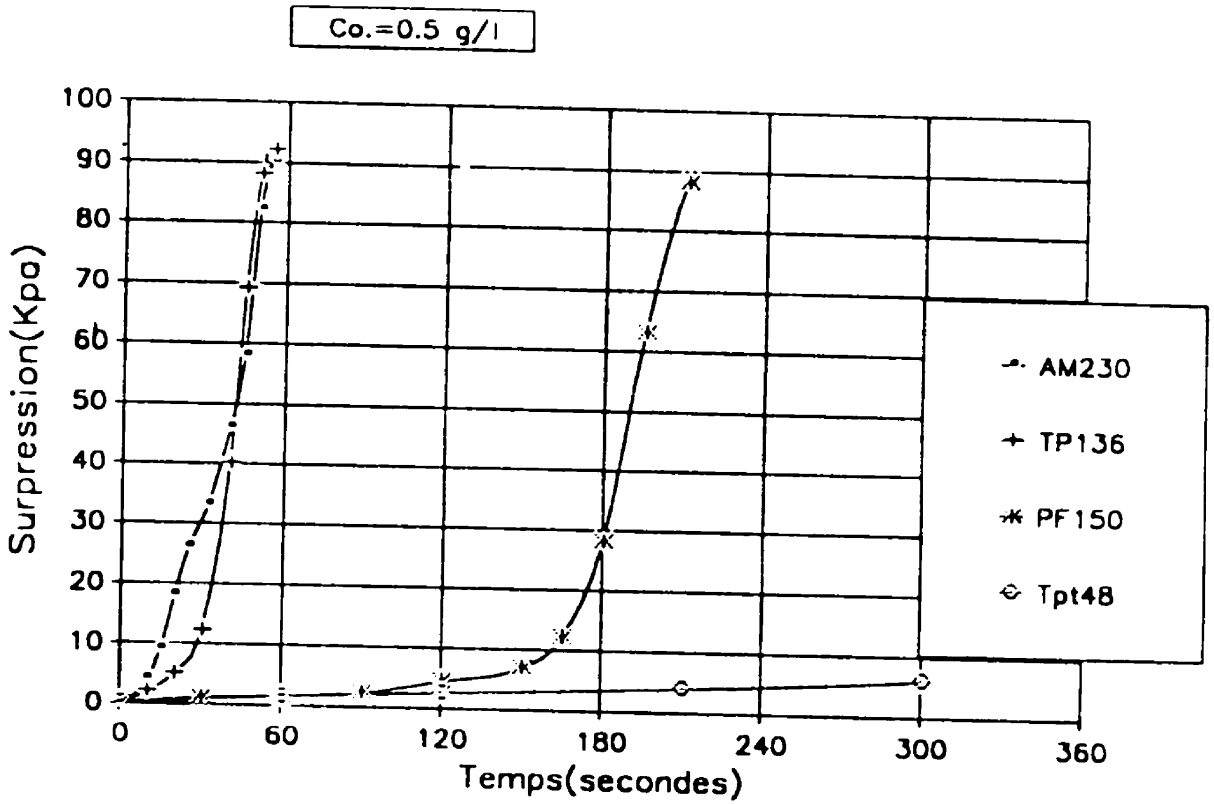


Figure 2.22 Influence de la structure des géotextiles sur les pertes de charge en terme de surpressions en fonction du temps (El-Amir, 1991)

risque au colmatage beaucoup moins élevé. Ceci n'est pas conforme aux observations sur les tissés testés par Hoogendoorn et Van-der-Meulen (1977) et Atmatzidis et al. (1982) bien que dans des conditions expérimentales différentes. Probablement que des essais de plus longues durées avec le géotextile TP48 donneraient des éléments de réponse à ce comportement. Aussi, il faut peut-être rapporter que parmi les caractéristiques physiques des géotextiles étudiés par El-Amir, ce tissé a la plus faible épaisseur (0.146 mm) et qui est environ 3 fois plus petite que celle de AM320 (0.36 mm).

En ce qui concerne l'influence de l'ouverture de filtration sur le colmatage, El-Amir confirme qu'en général, plus O_{95} est grand, plus le risque au colmatage est moindre (fig. 2.23). Tandis que la série d'essais réalisée avec le géotextile non tissé PF110 (O_{95} = 135 μm) et avec des suspensions contenant le sol B40 (d_{max} = 40 μm, d_{50} = 6.5 μm), l'auteur observe que malgré un O_{95}/d_{50} très grand (= 21), le colmatage augmente avec l'augmentation de la concentration initiale en particules solides (fig. 2.24) et particulièrement au delà de C_0 = 4 g/l où le risque au colmatage augmente nettement. Cette limite de concentration est obtenue aussi en terme de pourcentages de passant (fig. 2.25) mesurés à la fin des essais et qui sont très élevés (> 80 %). On peut penser que si cette tendance est observée pour des essais à plus longues durées (très supérieures à 6 min), elle ne peut être due qu'aux rapports O_{95}/d_{50} et O_{95}/d_{max} très élevés (respectivement égaux à 21 et 3.3).

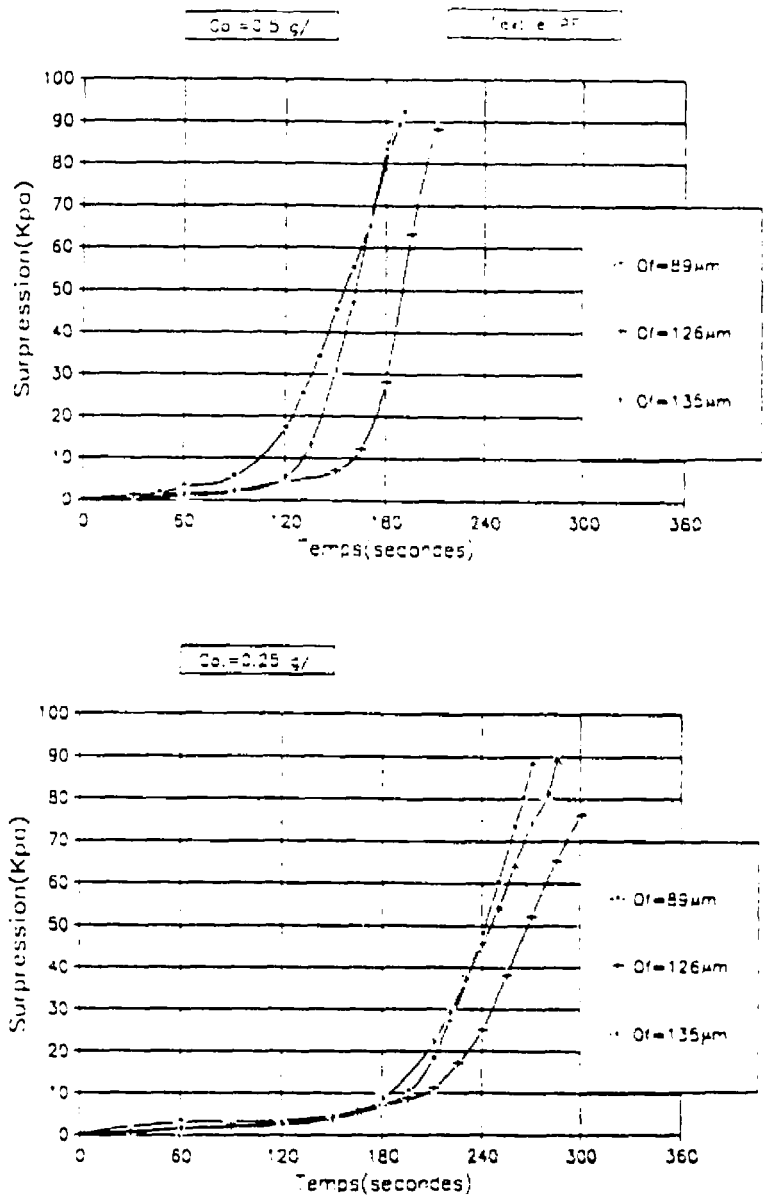


Figure 2.23 Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge d'un géotextile non tissé (El-Amir, 1991)

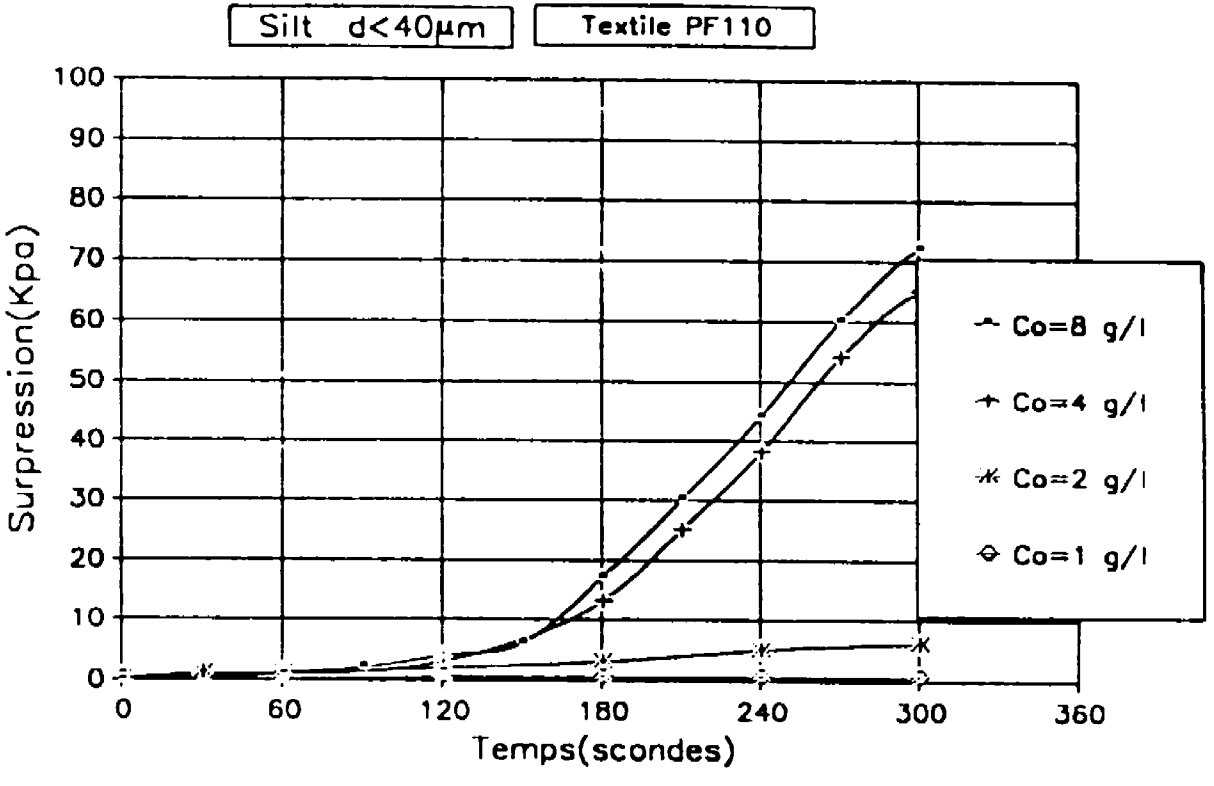


Figure 2.24 Influence de la concentration initiale en particules solides sur les pertes de charge (El-Amir, 1991)

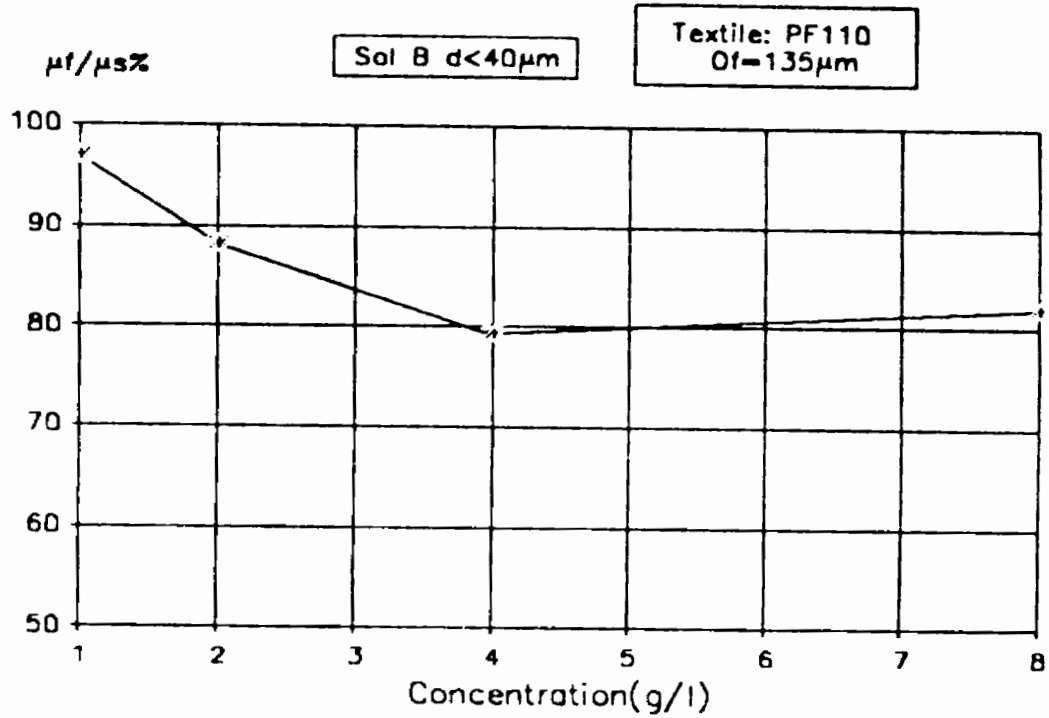


Figure 2.25 Influence de la concentration initiale en particules solides sur les pourcentages de passants (El-Amir, 1991)

f) Travaux de Ziani et al. (1993, 1995)

Dans le but d'évaluer les performances de filtration de suspensions en terme d'efficacité par les géotextiles non tissés, Ziani et al. (1993) exploitent certains résultats expérimentaux obtenus par Mlynarek (1989) et Gendrin (1991). Ils utilisent le modèle de l'efficacité E développé à partir des approches hydrodynamiques dans la filtration des suspensions par les milieux fibreux (Davies, 1952):

$$E = 1 - e^{-\alpha} \qquad (2.13)$$

où α est un coefficient qui dépend entre autres, des caractéristiques physiques du filtre. Dans le cas des géotextiles ayant une épaisseur T_g, une porosité n et un diamètre des fibres d_f, ce coefficient est égal à (Davies, 1973):

$$\alpha = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1 - n}{n} \cdot \frac{T_g}{d_f} \cdot E_R \qquad (2.14)$$

où E_R est un coefficient de capture qui caractérise le mécanisme de rétention des particules par les filtres. Dépendamment du mécanisme de filtration retenu, la détermination de ce coefficient est très compliquée car elle suppose la connaissance du champ de vitesses ψ des particules autour d'une fibre isolée (Lamb, 1932) ou dans un

système de fibres (Kuwabara, 1959; Happel, 1959).

Dans le cas d'un mécanisme par interception direct des particules par les fibres qui selon Stinson (1990), domine le processus dans le cas d'une filtration de suspensions par un milieu fibreux, le coeficient de capture E_R est donné par (Davies, 1973):

$$E_R = \frac{2\left(1+\frac{d_p}{d_f}\right).\ln\left(1+\frac{d_p}{d_f}\right)-\left(1+\frac{d_p}{d_f}\right)+\left(1+\frac{d_p}{d_f}\right)^{-1}}{2.H} \qquad (2.15)$$

où d_p est le diamètre des particules et H un coefficient hydrodynamique. Dans le cas des filtres fibreux très poreux (n > 90 %), ce coefficient est donné par Kuwabara (1959):

$$H = -\frac{3}{4} - \frac{1}{2}.\ln(1-n) \qquad (2.16)$$

ou par Happel (1959):

$$H = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}.\ln(1-n) \qquad (2.17)$$

En utilisant le coefficient hydrodynamique de Happel (1959), Stinson (1990) utlise le modèle de E_R pour le calcul des efficacités de filtration théoriques. Il compare ces dernières avec les efficacités mesurées d'un filtre synthétique non tissé en filtration de

suspension d'huile chargée de particules de diamètre compris entre 5 et 20 μm et concentrée à 2 mg /l. Pour les filtres monodisperses (même diamètre de fibres) avec des rapports d_p/d_f compris entre 0.26 et 0.31, il obtient des différences relatives entre les efficacités théoriques et les efficacités mesurées qui ne dépassent pas 0.8 % ou encore égales à 0 % pour des particules en suspension de diamètre = 5 μm.

Ziani et al. (1993) suggèrent d'une façon empirique et afin de rapprocher les efficacités théoriques des efficacités mesurées par Mlynarek (1989) et Gendrin (1991) sur certains géotextiles non tissés, que la rétention des particules en suspension est liée au rapport géométrique de l'ouverture de filtration sur le diamètre des particules. Ils remplacent le rapport d_p/d_f par d_p/FOS dans l'équation 2.15 en utilisant le coefficient hydrodynamique de Happel (1959).

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 2.5 et 2.6 où on remarque que le géotextile I de Mlynarek (1989) (tab. 2.5) donne une valeur de E_{th} sans commune mesure avec celle de E_{mes}. Ceci est dû à la très faible valeur de d_{50}/FOS à cause de l'ouverture de filtration très élevée. Pour un d_{50}/FOS = 0.139, E_{th} et E_{mes} sont presque égales. Le tabeau 2.6 montre que les efficacités théoriques sont très comparables à celles mesurées. Cependant, pour le géotextile non tissé aiguilleté PF150, E_{th} est très faible devant E_{mes} pour d_{50}/FOS = 0.16 mais la différence diminue avec des d_{50}/FOS croissant. La faible valeur de E_{th} peut être expliquée par la porosité relativement faible du PF 150 (n = 0.88, Ziani et al., 1993). Pour le BD U24N, qui est un non tissé aiguilleté de

Tableau 2.5 Comparaison entre les efficacités mesurées E_{mes} par Mlynarek (1989) et les efficacités théoriques E_{th} obtenues par Ziani et al. (1993).

Géotextiles	T_g (mm)	FOS (μm)	d_{50}/FOS	E_R	α	E_{th} (%)	E_{mes} (%)
1	4.51	237	0.037	0.0015	0.025	2.5	24
2	2.66	61	0.139	0.027	0.359	30	29

Tableau 2.6 Comparaison entre les efficacités mesurées E_{mes} par Gendrin (1991) et les efficacités théoriques E_{th} obtenues par Ziani et al. (1993).

Géotextiles	T_g (mm)	FOS (μm)	d_{50}/FOS	E_R	α	E_{th}	E_{mes}
PF 150	1.7	126	0.159	0.015	0.12	11	30
	1.7	126	0.408	0.085	0.698	50.2	65
	1.7	126	0.568	0.154	1.263	71.7	81
BD U24N	2.1	147	0.136	0.021	0.150	14	21
	2.1	147	0.349	0.124	0.886	59	60
	2.1	147	0.487	0.226	1.614	80	83

porosité n = 0.93, les résultats des efficacités sont très comparables particulièrement pour d_{50}/FOS supérieur ou égal à 0.35. Ces résultats permettent à Ziani et al. (1993) de fixer les limites de validité du modèle empirique de prédiction de l'efficacité des géotextiles non tissés à des d_{50}/FOS compris entre 0.13 et 0.5, c'est-à-dire FOS/d_{50} compris entre 2 et 7.

Très récemment encore, Ziani et al. (1995) ont essayé de vérifier ce modèle de E sur des géotextiles non tissés aiguilletés en filtration de suspensions à différentes concentrations initiales en particules solides variant de 0.5 à 10 g/l. Les filtres utilisés sont des non tissés d'ouvertures de filtration FOS comprises entre 78 et 148 μm et de porosités très élevées (> 90 %). Le sol en suspension est un silt argileux de diamètre moyen égal à 41 μm. L'expérimentation utilisée est décrite au chapitre 4 et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.7. Ces résultats permettent à Ziani et al. (1995) de confirmer les limites de validité en terme de rapport FOS/d_{50} mais aussi en terme de concentration en particules solides. En effet, les efficacités théoriques sont en assez bon accord avec les efficacités mesurées pour des C_0 ne dépassant pas 5 g/l avec en général, des différences relatives inférieures ou égales à 20 %. À cette concentration, Ziani et al. (1995) constatent qu'il y a un changement de structure par la formation d'un cake (gâteau de sol) à la surface des filtres et que le modèle de E décrit ci-dessus ne peut pas être appliqué. Cette limite de concentration initiale rejoint celle de El-Amir (1991) qui constate qu'à partir de C_0 = 4 g/l, il y a colmatage des géotextiles par augmentation brusque des surpressions à l'amont des filtres. Enfin, le tableau 2.7 montre que les

différences entre E_{th} et E_{mes} obtenues par ce modèle de E permettent de montrer que les limites de FOS/d_{50} pour lesquels le modèle peut-être appliqué sont conformes à celles observées par Ziani et al. (1993). Cependant, il faut signaler que la théorie utilisée par ces auteurs présente des lacunes importantes et qu'elle ne permet pas encore de justifier l'introduction de l'ouverture de filtration FOS dans le modèle de l'efficacité de filtration. Ce qui fait diminuer la rigueur de la comparaison entre E_{th} et E_{mes}.

Tableau 2.7 Différences relatives entre les efficacités de filtration théoriques et mesurées des géotextiles non tissés étudiés par Ziani et al. (1995)

Géotextiles	A1	B1	A3	A2	A4
d_{50}/FOS	0.28	0.29	0.33	0.45	0.53
C_0 = 0.5 g/l	22	20	9	27	14
C_0 = 1 g/l	16	-	7	38	7
C_0 = 2.5 g/l	4	20	3	20	7
C_0 = 5 g/l	14	-	21	18	6
C_0 = 10 g/l	69	79	81	75	64

En résumé, les travaux de Ziani et al. (1993, 1995) ont permis d'ouvrir un champ d'investigation intéressant pour modéliser l'efficacité de filtration des suspensions par les géotextiles non tissés de porosités très élevées. Cependant, cette approche hydrodynamique très compliquée ne donne pas encore les résultats attendus à cause des

conditions aux limites qui ne permettent pas encore de justifier l'introduction du rapport FOS/d_{50} dans l'expression du coefficient de capture. Enfin, les travaux de Ziani et al. ont permis de mettre en évidence une limite de concentration initiale en particules solides à partir de laquelle le processus de rétention des particules par les géotextiles non tissés engendre la formation d'un gâteau de sol à la surface des filtres.

2.5 Conclusions

En vue d'apporter une contribution à l'étude très complexe de la filtration des suspensions par les géotextiles, l'analyse de la revue bibliographique a permis de dégager les conclusions suivantes:

- Un bref rappel de certains travaux antérieurs concernant les caractéristiques physiques des géotextiles a permis de définir les facteurs pertinents pour la suite de notre étude. Si en ce qui concerne les paramètres de la masse surfacique, de l'épaisseur, de la porosité et du diamètre des fibres des géotextiles, un consensus quant à leur détermination et leur application semble être unanime, il n'en est pas de même pour le paramètre de l'ouverture de filtration. En effet, la détermination de celle-ci pose encore problème étant données les différentes méthodes employées à travers le monde et qui diffèrent les unes des autres. Mais, d'après la littérature étudiée, il nous semble que les résultats théoriques concernant l'ouverture FOS obtenus par les modèles de porométrie et confrontés aux résultats expérimentaux particulièrement pour les géotextiles non

tissés, permettent de justifier le choix de l'essai de tamisage hydrodynamique utilisé en France et au Canada.

- Les études peu nombreuses sur la filtration des suspensions par les géotextiles montrent que les performances de ces matériaux sont évalués à partir de deux paramètres: leur sensibilité au colmatage et leur capacité de rétention. Selon les auteurs, la notion de colmatage est évaluée soit en terme d'augmentation des pertes de charge de l'écoulement à travers les géotextiles, en terme de réduction de vitesses des écoulements ou de perméabilités des filtres ou encore en terme de réduction de durées d'utilisation. La rétention des particules de sol en suspension est étudiée en terme de pourcentage de passants ou d'efficacité de filtration.

- Ces deux paramètres ont été beaucoup plus étudiés expérimentalement et leur analyse est relative aux conditions expérimentales de chaque auteur. Cependant, tous les travaux montrent que les géotextiles tissés ont une sensibilité au colmatage très élevée, et ce malgré des ouvertures de filtration élevées ($> 200\ \mu m$, Hoogendoorn et Van-der-Meulen, 1977). À un degré moindre, les géotextiles non tissés présentent un meilleur comportement dépendamment des paramètres comme l'ouverture de filtration ou la concentration initiale en particules solides des suspensions. En effet, plus les ouvertures de filtration sont élevées, moins les non tissés se colmatent et moindre est l'efficacité de filtration. Quant à l'influence de la concentration sur la filtration des suspensions, son rôle n'est pas encore tout-à-fait déterminée. Pour la filtration des suspensions contenant

des sols pulvérulents à granulométrie uniforme, Gendrin (1991) observe son influence sur la rétention des particules par les géotextiles ayant un rapport FOS/d supérieur à 1.7. Tandis que El-Amir (1991) fixe une limite de C_0 = 4 g/l, au-delà laquelle il y a une influence remarquable sur le processus de colmatage dans le cas de la filtration des suspensions contenant des sols fin cohérents par les géotextiles non tissés.

- La revue de la littérature montre que très peu de travaux théoriques sont disponibles, pour ne pas dire inéxistants, pour permettre la prédiction de ces deux paramètres de base de la filtration des suspensions par les géotextiles. La simulation de Gendrin (1991) est limitée aux géotextiles tissés en filtration de sol pulvérulents et basée sur la rétention par effet de voûtes. Les résultats théoriques donnent les pourcentage de passants conformes à ceux obtenus expérimentalement grâce à l'introduction de coefficients empiriques dans le programme de simulation. Les travaux de Ziani et al. (1993, 1995), s'inspirant de ceux de Stinson (1990), proposent un modèle empirique de prédiction de l'efficacité filtration de suspensions par les géotextiles non tissés. Si l'approche hydrodynamique très compliquée adoptée par ces auteurs n'a pas permis de justifier l'introduction du paramètre FOS/d pour caractériser la rétention des particules, il n'en demeure pas moins que les résultats obtenus ont mis en évidence l'influence des paramètres de l'ouverture de filtration, de la structure des géotextiles non tissés et de la concentration en particules solides des suspensions.

CHAPITRE 3

MODÈLE DE FILTRATION DE SUSPENSIONS

3.1 Introduction

Dans le but d'étudier et d'évaluer, par simulation de la filtration de suspensions, les performances, en terme d'efficacité, des géotextiles non tissés, la caractérisation de la structure de ces derniers, et en particulier leur porométrie, est nécessaire. Ce paramètre de la structure est très important pour l'étude de la filtration de suspensions par les milieux fibreux dont les mécanismes sont très complexes.

Théoriquement, on n'est pas encore arrivé à déterminer l'efficacité de filtration de suspensions des géotextiles. Une approche, basée sur les phénomènes de transport de particules solides par un fluide à travers les géotextiles non tissés, a été envisagée par Ziani et al. (1993, 1995). Cette approche hydrodynamique, utilisant les notions de champ de vitesses des particules dans un fluide autour des fibres, n'est pas tout-à-fait adéquate à cause des conditions aux limites imposées par leurs auteurs et qui restent encore très discutables.

Dans ce chapitre, une approche phénoménologique, basée sur les probabilités de passage des particules, est envisagée en vue de décrire les aspects de filtration des suspensions en terme de capacités de rétention des particules solides (efficacité), de distribution

granulométrique des particules après filtration ainsi qu'en terme de colmatage des filtres. Cette approche est basée sur un modèle de distribution granulométrique des "conduits" développé par Faure (1988) pour les géotextiles non tissés. Ce modèle permet d'estimer l'ouverture de filtration, ou ouverture théorique des conduits, en vue d'analyser le comportement de ces matériaux en filtration des sols. Une modification de ce modèle, validée à partir des mesures des ouvertures de filtration FOS par tamisage hydrodynamique, nous permet de l'utiliser pour la simulation de la filtration des suspensions. Cette simulation théorique est réalisée sur des géotextiles non tissés aiguilletés.

Ces matériaux textiles sont connus pour leurs fonctions de filtration et sont caractérisés par des porosités n très élevées, souvent supérieures à 90 %, par comparaison aux non tissés thermoliés où n est compris entre 50 et 90 %. Ce paramètre de la porosité est lié à la structure interne des géotextiles que l'on caractérise par la porométrie. Celle-ci permet donc de classer les pores et, selon les techniques utilisées, ce classement se fait selon les dimensions, la forme et la répartition des pores (Lombard 1985). Du point de vue analogique, en géotechnique, la granulométrie permet de classer les sols selon la distribution des tailles des grains qui les constituent. En plus, les volumes des vides sont relativement faibles au point où les porosités des sols dépassent très rarement 40 à 50 %.

Les observations microscopiques sur les géotextiles non tissés montrent la complexité

de l'espace poral qui les caractérise. La distribution dimensionnelle de cet espace peut être approchée à partir des modèles probabilistes. Ces matériaux, constitués de fibres déposées aléatoirement, présentent un réseau de vides à trois dimensions qu'il est impossible de décrire pour le moment et, encore moins, de mesurer dans son ensemble.

3.2 Modèle de structure

Dans les applications de filtration par les géotextiles, l'écoulement se fait perpendiculairement au plan de la nappe. Le fluide traverse donc un volume des vides caractérisé par la distribution des vides, entre fibres, en forme et en dimension.

Les premiers travaux ont été réalisés à l'Ecole Polytechnique de Montréal (Lombard 1985) et poursuivis à l'Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique (IRIGM) de Grenoble (Rollin et al., 1985a; Millot, 1986; Faure, 1988 et Gendrin 1991). Les modèles théoriques développés sont basés sur les notions de probabilités géométriques et, particulièrement, la théorie des polyèdres poissoniens de Matheron (1971) qui n'est valable que pour les structures fibreuses non tissées.

3.2.1 Théorie des polyèdres poissoniens

L'observation au microscope d'une lame mince de géotextile non tissé dans un plan parallèle au plan de la nappe (coupe longitudinale) montre la similitude entre un réseau

fibreux et une distribution aléatoire de droites dans un plan. Une telle distribution, constituant un réseau de droites implantées au hasard dans un espace à n dimensions, a été étudiée par Matheron (1971). Appliqué à 2 dimensions, le principe des polyèdres poissoniens consiste à répartir des droites de directions Δ fixées aléatoirement (fig. 3.1), par lesquelles sont implantées des droites perpendiculaires, suivant une loi de Poisson de densité donnée. Avec plusieurs droites Δ, on obtient un réseau de droites délimitant des polygones convexes distribués aléatoirement.

La description de ce réseau de droites est caractérisée par deux paramètres spécifiques:
- λ, densité d'implantation des droites poissoniennes (ou densité de la loi de Poisson),
- σ, longueur spécifique de droites par unité de surface du plan.

Ainsi, Matheron (1971) démontre que $\sigma = \pi\lambda$ et propose une expression analytique de la distribution (ou granulométrie) des cercles, de rayon r, inscrits dans les polygones convexes limités par les droites:

$$P(r) = (1 + \sigma r)^2 . e^{-2\sigma r} \qquad (3.1)$$

Cette expression représente la probabilité d'avoir un cercle inscrit dans un polygone convexe et ayant un rayon supérieur ou égal à r. Autrement dit et par analogie aux opérations de tamisage, cette fonction est à rapprocher de la notion de refus dans un

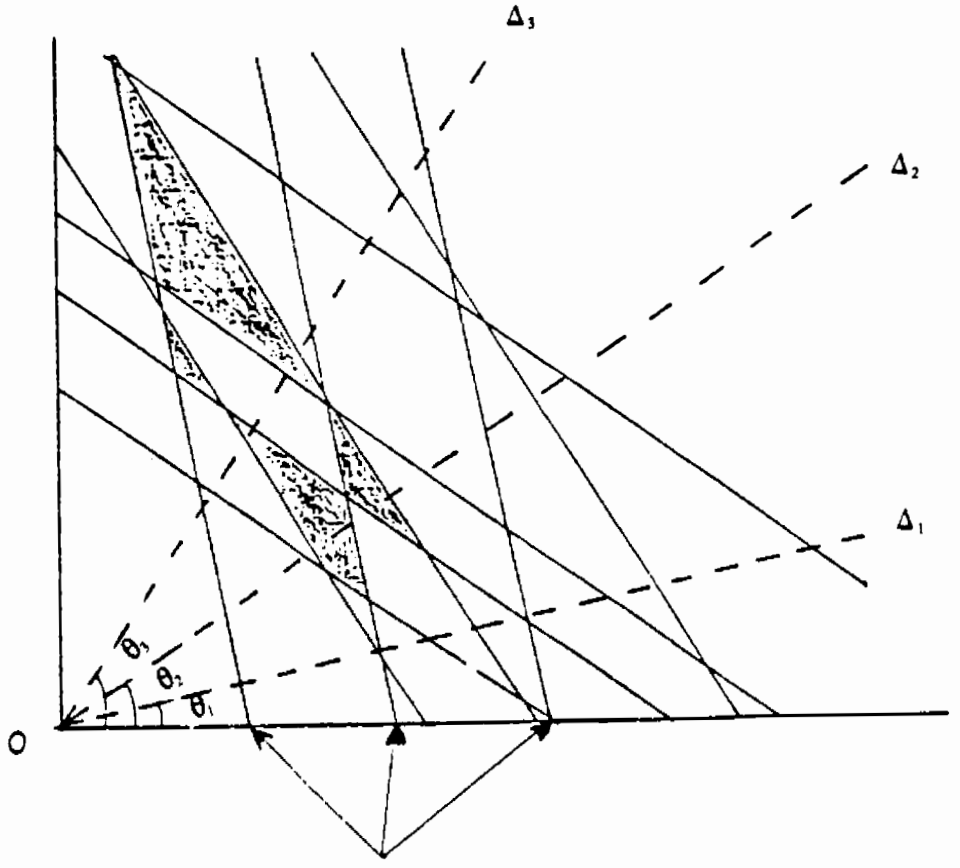


Figure 3.1 Réseau de droites délimitant des polygones convexes distribués aléatoirement (Gendrin, 1991)

tamis d'ouverture maximale égale à r (Lombard, 1985). Dans ce cas, la probabilité d'avoir un cercle inscrit de rayon inférieur à r est (1 - P(r)):

$$H(r) = 1 - P(r) \qquad (3.2)$$

et la fonction de distribution h(r) des cercles induits par les droites d'un plan est:

$$h(r) = \frac{dH(r)}{dr} = 2\sigma^2 r(1 + \sigma r)e^{-2\sigma r} \qquad (3.3)$$

3.2.2 Application aux géotextiles non tissés

L'application de la théorie des polyèdres poissoniens de Matheron (1971) sur les géotextiles non tissés suppose la détermination des paramètres spécifiques σ et λ relatifs à ces matériaux. Mais ces derniers présentent une certaine épaisseur T_t. On supposera, comme proposé par Gourc (1982) et Faure (1988), qu'ils sont constitués de nappes élémentaires indépendantes d'épaisseur T_e, ayant mêmes caractéristiques spécifiques et empilées aléatoirement les unes sur les autres de façon à réaliser un ensemble de tubes tortueux au travers desquels s'écouleront le fluide et les particules au cours de la filtration. Aussi, on suppose que 2 fibres au maximum s'entrecroisent dans un plan unitaire (Lombard, 1985) assimilé à une nappe élémentaire. Cette considération amène

que l'épaisseur T_e de cette nappe est 2 fois le diamètre des fibres ($T_e = 2\ d_f$).

Soit μ_g, la masse surfacique d'un géotextile non tissé d'épaisseur T_g, de porosité n et de diamètre des fibres d_f. La masse M_e d'une nappe élémentaire d'épaisseur $2d_f$ est la masse des fibres contenues dans cette nappe; elle est égale au produit du volume des fibres de longueur totale σ par la masse volumique des fibres ρ_f:

$$M_e = 2\frac{(\pi d_f)^2}{4} \cdot \sigma \cdot \rho_f \qquad (3.4)$$

Or, la masse d'une nappe élémentaire est aussi égale à:

$$M_e = \frac{\mu_g}{T_g} \cdot T_e \qquad (3.5)$$

Ce qui donne:

$$\sigma = \frac{2}{\pi d_f^2} \cdot \frac{1}{\rho_f} \cdot \frac{\mu_g}{T_g} \cdot T_e \qquad (3.6)$$

ou encore, puisque $\mu_g/(\rho_f.T_g) = 1 - n$:

$$\sigma = \frac{2}{\pi d_f^2}(1 - n)\, T_e \qquad (3.7)$$

Si n^* est la porosité surfacique du plan observée par transmission et σ^* la longueur de fibres de ce même plan, alors:

$$\sigma^* = \frac{(1 - n^*)}{d_f} \qquad (3.8)$$

La condition pour avoir $\sigma = \sigma^*$ et $n = n^*$ donne:

$$T_e = \frac{\pi}{2} d_f \qquad (3.9)$$

Cette valeur est supérieure à d_f, ce qui est compatible avec la condition d'indépendance des nappes. Nous retenons $T_e = 2\ d_f$ et σ devient égal à:

$$\sigma = \frac{4(1 - n)}{\pi\ d_f} \qquad (3.10)$$

En considérant une épaisseur de nappe élémentaire égale à d_f ($T_e = d_f$), Faure (1988) trouve $T_e = \pi.d_f/4$ qui est une valeur inférieure à d_f, donc incompatible avec la condition d'indépendance des nappes. Il développe son modèle de structure des géotextiles non tissés sur la base de $T_e = d_f$. À titre de comparaison, nous confrontons, dans le paragraphe 3.3, les résultats obtenus sur les ouvertures de filtration avec ceux de l'approche de Faure.

La condition de Matheron (1971) donne le paramètre de la densité de Poisson $\lambda = \sigma/\pi$:

$$\lambda = \frac{4}{\pi^2 d_f}(1-n) \qquad (3.11)$$

3.2.2.1 Granulométrie des pores d'une nappe élémentaire

On a vu que la théorie des polyèdres poissoniens donne la probabilité d'inscrire un cercle de diamètre d entre les fibres, cette probabilité est la fonction h(r = d/2) (équation 3.3):

$$h(d) = \sigma^2 d\left(1 + \sigma\frac{d}{2}\right) e^{-\sigma d} \qquad (3.12)$$

Mais cette théorie utilise des droites de largeur nulle. Or, dans les géotextiles, les fibres ont un diamètre égal à d_f dont il faut tenir compte dans le modèle poissonien. Dans ce cas, la probabilité h(d) d'inscrire un cercle de diamètre d entre les fibres devient une probabilité d'inscrire un cercle de diamètre $d + d_f$ entre les droites des polyèdres poissoniens, soit:

$$g(d) = h(d+d_f) = \sigma^2 (d+d_f)\left(1+\frac{\sigma (d+d_f)}{2}\right) e^{-\sigma (d+d_f)} \qquad (3.13)$$

La granulométrie des pores d'une nappe élémentaire des cercles inscrits entre les fibres est alors:

$$G(d) = \frac{\int_0^d g(u)\,du}{\int_0^\infty g(u)\,du} \qquad (3.14)$$

où g(u) est selon l'équation 3.13:

$$g(u) = h(u + d_f) \qquad (3.15)$$

Ce qui donne, selon Faure (1988):

$$G(d) = 1 - \left[\frac{2 + \sigma(d+d_f)}{2 + \sigma d_f}\right]^2 e^{-\sigma d} \qquad (3.16)$$

avec:

$$\sigma = \frac{4(1 - n)}{\pi\, d_f}$$

On voit que cette granulométrie des pores dépend uniquement de deux paramètres de structure: la porosité n et le diamètre des fibres d_f

3.2.2.2 Dimension des conduits des géotextiles non tissés

La notion de "conduit élémentaire" a été définie par Faure (1988) qui considère qu'un géotextile non tissé, d'épaisseur T_g, est constitué de N nappes élémentaires d'épaisseur T_e dont les pores sont assimilés à des cylindres droits (de base égale au cercle inscrit et de hauteur T_e) perpendiculaire au plan de la nappe.

La granulométrie G(d) est la probabilité d'avoir un cercle inscrit entre les fibres de diamètre inférieur ou égal à d. (1-G(d)) sera donc la probabilité qu'un conduit élémentaire de diamètre supérieur ou égal à d traverse la nappe élémentaire et la probabilité de traverser les N nappes élémentaires est alors:

$$[1 - G(d)]^N \qquad (3.17)$$

On en déduit donc la granulométrie des conduits sur l'épaisseur T_g des géotextiles non tissés:

$$Q(d) = 1 - [1 - G(d)]^N \qquad (3.18)$$

En remplaçant G(d) par la relation 3.16, Q(d) devient:

$$Q(d) = 1 - \left[\frac{2 + \sigma(d+d_f)}{2 + \sigma . d_f}\right]^{2N} e^{-N.\sigma.d} \qquad (3.19)$$

avec:

$$N = \frac{T_g}{2d_f} \qquad (3.20)$$

La forme de l'équation 3.19 montre que Q(d) tend vers 1 quand d tend vers l'infini (fig. 3.2); autrement dit, le conduit maximum ne peut être déterminé. Dans ce cas, il est défini un conduit de diamètre d = C_{95} tel que:

$$Q(C_{95}) = 0.95 = 95\ \% \qquad (3.21)$$

ce qui veut dire que 95 % des conduits ont un diamètre inférieur à C_{95} qui sera retenu comme ouverture de filtration théorique.

Ainsi, pour tout géotextile non tissé, on peut déterminer l'ouverture de filtration théorique C_{95} connaissant la porosité n, l'épaisseur T_g et le diamètre des fibres d_f. Une meilleure façon de vérifier la validité du modèle théorique des polyèdres poissoniens est de procéder par analyse d'images sur lames minces de géotextiles non tissés (Millot, 1986; Faure, 1988; Gendrin, 1991). Cette façon de faire sort du cadre de notre étude. Aussi, il faut rappeler que l'objectif principal de la présente étude est d'utiliser les

probabilités de passage des particules pour simuler un essai de filtration des suspensions permettant de prédire l'efficacité de filtration des géotextiles non tissés. Ainsi, et afin de justifier cette approche, nous vérifions la validité de la distribution Q(d) des conduits des géotextiles non tissés aiguilletés retenus pour notre étude. Cette vérification se fait à partir de la détermination des ouvertures de filtration expérimentales FOS par tamisage hydrodynamique (cf. paragraphe 3.3).

3.2.3 Influence de la porosité et de l'épaisseur sur la granulométrie des conduits des géotextiles non tissés

Dans l'équation 3.19, si nous posons $\gamma = \sigma.d_f = 4\,(1 - n)/\pi$, la fonction Q(d) devient:

$$Q(d) = 1 - \left[\frac{2 + \gamma\left(1+\frac{d}{d_c}\right)}{2 + \gamma}\right]^{2N} e^{-N.\gamma\frac{d}{d_c}} \qquad (3.22)$$

Les figures 3.2 et 3.3 présentent la variation de Q(d) en fonction de d/d_f à porosité fixée et à $N = T_t/2d_f$ constant. Plus N est grand, autrement dit, plus le géotextile est épais (à même porosité), plus les ouvertures des conduits sont petites. L'influence de la porosité n sur les ouvertures des conduits est aussi très marquée. En effet, par comparaison des courbes de Q(d), les figures 3.2 et 3.3 montrent que, à $n = 0.85$, les ouvertures sont divisées par 7 à 8 quant N est multiplié par 10 (fig. 3.3) alors qu'elles

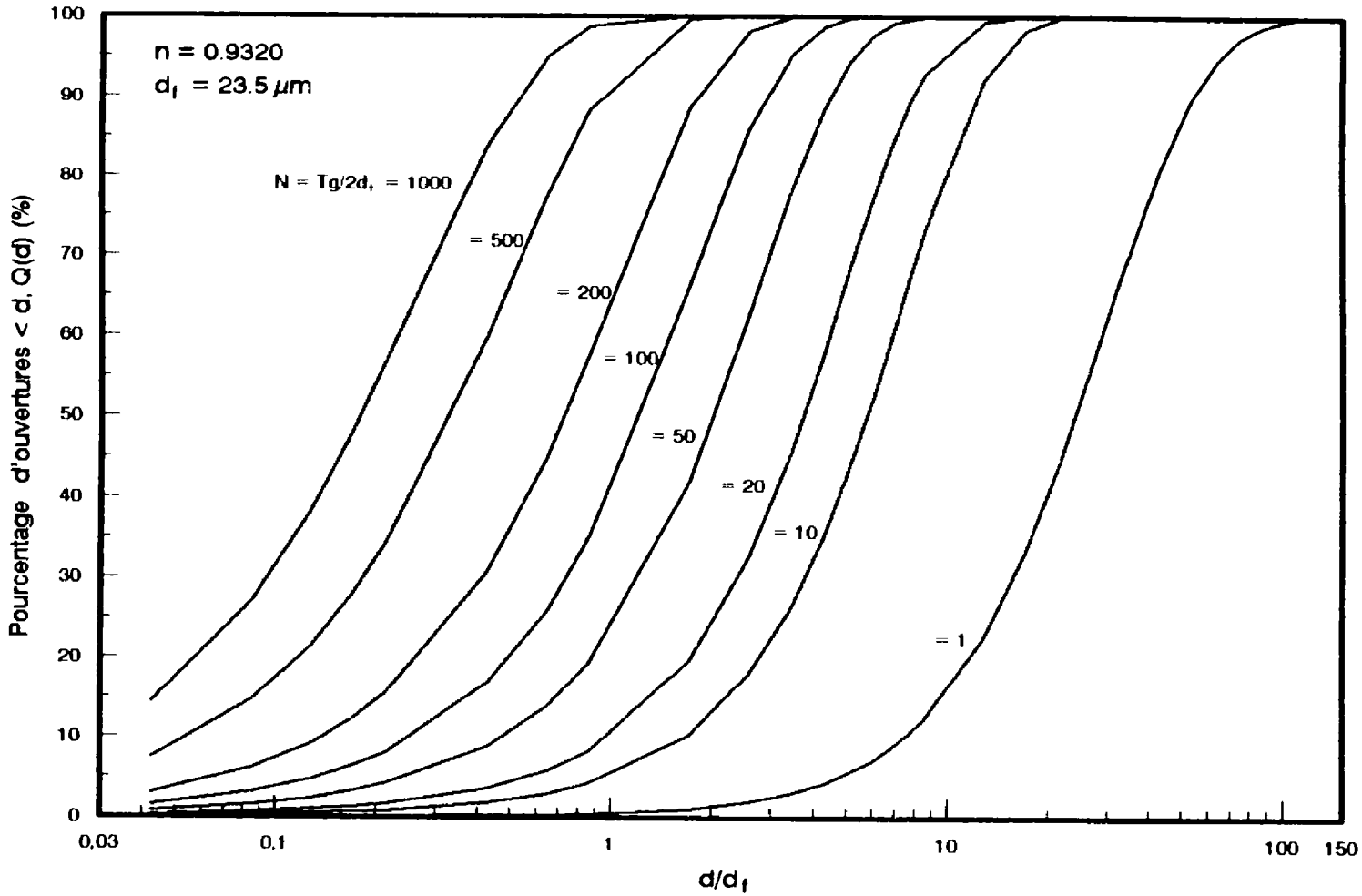


Figure 3.2 Granulométrie des conduits en fonction de T_g (n = 0.932)

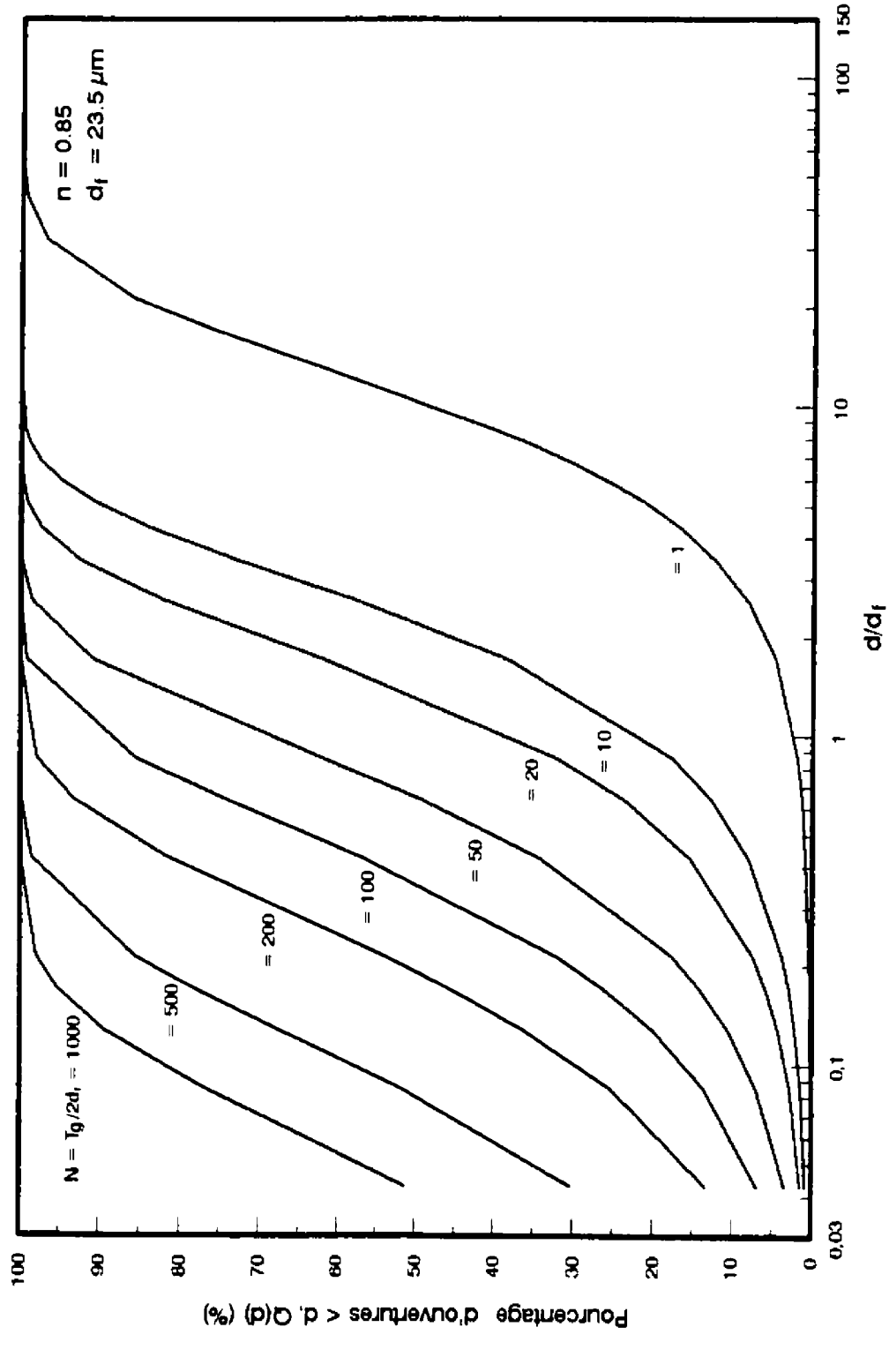


Figure 3.3 Granulométrie des conduits en fonction de T_g (n = 0.85)

ne sont divisées que par 4 à 5 à n = 0.932 (fig. 3.2).

Dans la figure 3.4, sont présentés tous les résultats théoriques de Q(d) en fonction de d pour tous les géotextiles non tissés aiguilletés étudiés. Les ouvertures théoriques C_{95} correspondant à $Q(C_{95})$ = 95 % sont présentées dans le tableau 3.1. Pour les géotextiles A (paragraphe 3.3), C_{95} est compris entre 79 et 177 μm; ceux des géotextiles B1 et B2 sont égaux respectivement à 156 et 60 μm. Ces ouvertures seront discutées et analysées dans le paragraphe suivant en fonction des ouvertures de filtration expérimentales, FOS, déterminées par tamisage hydrodynamique.

3.3 Validation du modèle de structure des géotextiles étudiés

Habituellement, un modèle mathématique est bâti d'une part, sur un certain nombre de principes physiques acceptables et d'autre part, sur un certain nombre d'hypothèses ou de suppositions nécessaires aux manipulations mathématiques. Nous avons vu que certaines caractéristiques physiques intrinsèques des géotextiles interviennent dans le modèle de structure. Il s'agit de l'épaisseur T_g, de la porosité n et du diamètre des fibres d_f. Avec la masse surfacique μ_g, il faut rappeler que toutes ces caractéristiques ont une influence sur l'ouverture de filtration et leur mesure expérimentale est fondamentale.

Avant de décrire, plus ou moins en détails, tous les appareillages utilisés pour la mesure des caractéristiques physiques des géotextiles étudiés, les procédures et principes de

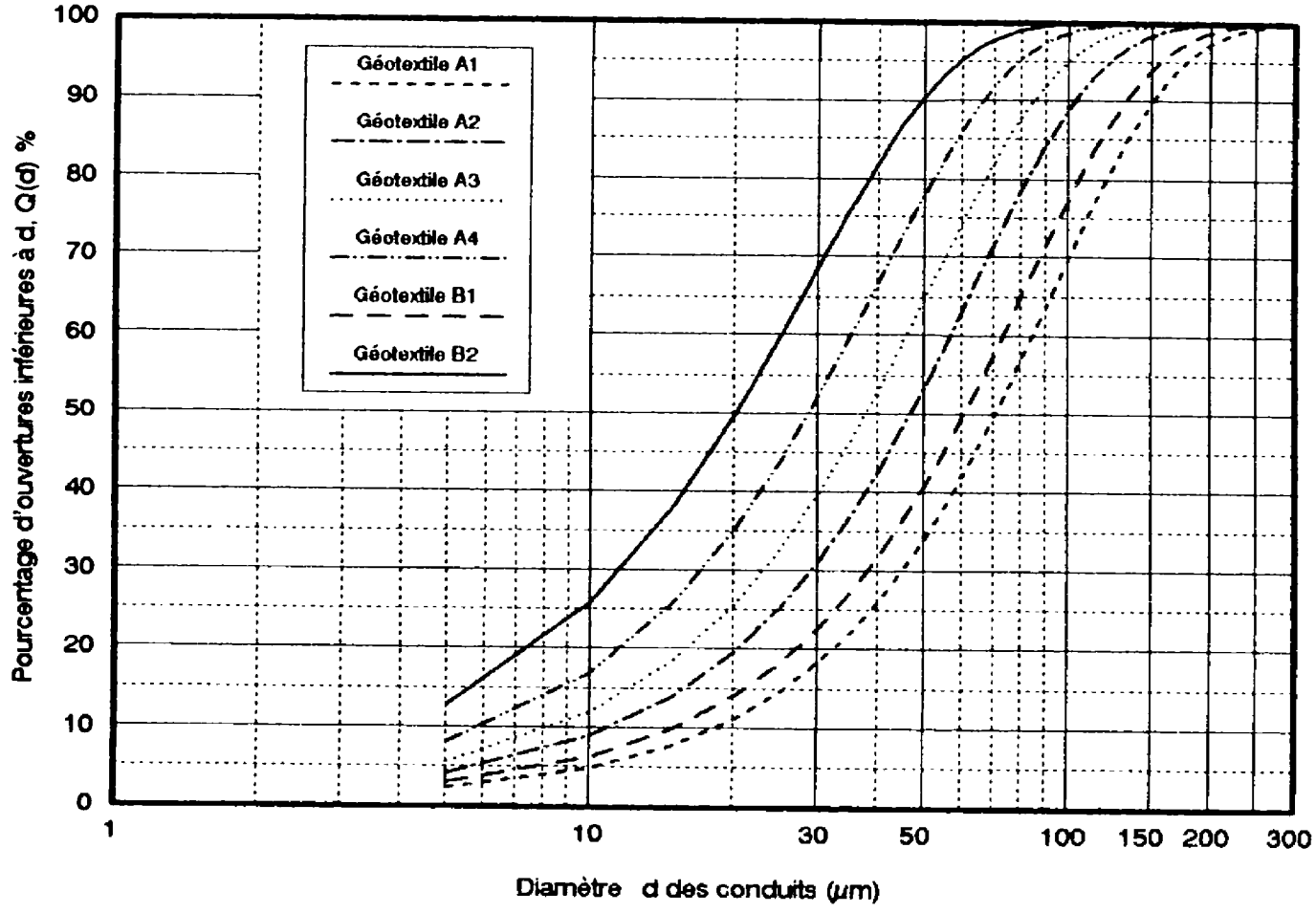


Figure 3.4 Granulométrie des conduits des géotextiles non tissés étudiés

Tableau 3.1 Ouvertures des conduits théoriques C_{95}

Géotextiles	T_g (mm)	d_f (μm)	n	C_{95} (μm)
A1	1.3	23.5	0.9320	177
A2	1.9	23.5	0.9233	123
A3	3.2	23.5	0.9314	100
A4	4.1	23.5	0.9266	79
B1	1.4	25	0.9201	156
B2	3.5	25	0.8910	60

mesures ainsi que les résultats obtenus, il nous semble nécessaire de justifier le choix des géotextiles à tester.

3.3.1 Échantillonnage et critères de choix

Nous avons vu dans la revue bibliographique que les travaux de Ziani et al. (1993, 1995) ont mis en évidence un critère de validité du paramètre de l'efficacité de filtration sur des géotextiles non tissés aiguilletés testés par Mlynarek (1989) et Gendrin (1991). Ce critère, de la forme FOS/d_{50}, est compris entre 2 et 7.7. En effet, pour un même matériau filtrant, la différence entre l'efficacité théorique E_{th} et l'efficacité mesurée E_{mes} diminuait pour des FOS/d_{50} décroissant. Les suspensions filtrées contenaient des sols silteux dont le d_{50} variaient entre 8.5 et 71.6 μm (Mlynarek, 1989; Gendrin, 1991) ce qui correspondait à des FOS compris entre 61 et 147 μm.

En général, les sols en suspensions sont des sols silteux ou silteux-limoneux de diamètre maximum inférieur à 75 μm et de diamètre moyen autour de 30 à 50 μm. Pour rester dans l'ordre de grandeur de FOS/d_{50} variant entre 2 et 7.7, il faut que les géotextiles choisis aient des FOS compris entre 60 et 385 μm. Ceci nous oriente sur le choix de matériaux géotextiles non tissés aiguilletés connus pour être très poreux (porosité n > 90 %). Or, il faut rappeler aussi qu'il n'existe pas, sur le marché, de produits aiguilletés ayant des ouvertures FOS supérieures à 250 ou même 200 μm. Nous avons retenu pour notre programme expérimental six géotextiles disponibles au laboratoire de GEOSEP de

l'École Polytechnique et provenant de deux manufacturiers différents. Il s'agit de quatre non tissés aiguilletés provenant de la compagnie A et numérotés de A1 à A4 et de deux non tissés aiguilletés provenant de la compagnie B, identifiés comme B1 et B2. Du point de vue structure, ces produits diffèrent, les uns des autres, par la nature des fibres (matériau, longueur et diamètre).

3.3.2 Mesure des caractéristiques physiques des géotextiles étudiés

3.3.2.1 Appareillages et résultats obtenus

Pour pouvoir vérifier le modèle de structure proposé ci-dessus, nous avons mesuré tous les paramètres physiques des six géotextiles étudiés qui interviennent dans ce modèle. Pour la masse surfacique et l'épaisseur, dix échantillons de chaque géotextile ont fait l'objet de mesure et la moyenne pour chacun des deux paramètres est calculée ainsi que l'écart type σ_x et le coefficient de variation CV. La porosité n est estimée à partir d'une relation simple liant la masse surfacique μ_g, l'épaisseur T_g et la masse volumique des fibres ρ_f. Le diamètre des fibres est estimé à partir des mesures sur photographies prises au microscope électronique. Enfin, l'ouverture de filtration FOS est mesurée sur quatre échantillons pour chaque géotextile à l'aide du tamisage hydrodynamique.

a) Masse surfacique μ_g et épaisseur T_g

La masse surfacique est évaluée à partir des mesures de masse très simples par pesée

d'échantillons; ces masses sont rapportées à leur section respective. Cette dernière est découpée selon les dimensions 100 cm^2 (10 * 10). Les pesées sont réalisées à l'aide d'une balance électronique graduée au 1/100 de gramme. L'écart type σ_x et le coefficient de variation CV sont calculés selon les relations suivantes (Benjamin et Cornell, 1970):

$$\mu_g = \frac{1}{N_E} \Sigma \mu_{gi} \qquad (3.23)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N_E} \Sigma (\mu_{gi} - \mu_g)^2} \qquad (3.24)$$

$$CV = 100 \frac{\sigma_x}{\mu_g} \qquad (3.25)$$

où N_E est le nombre d'échantillons pour chaque géotextile et μ_g, la masse surfacique de l'échantillon i.

L'épaisseur T_g est mesurée à l'aide de l'appareil présenté dans la figure 3.5. Il s'agit d'une plaque de masse égale à 600 grammes dont la base est circulaire de diamètre 6 cm reposant sur une plaque horizontale. La masse exerce sur l'échantillon de géotextile, placé entre les deux plaques, une pression de 2 kPa ce qui correspond à une compression normale généralement admise dans la mesure de T_g (Lombard, 1985) et ce à cause de

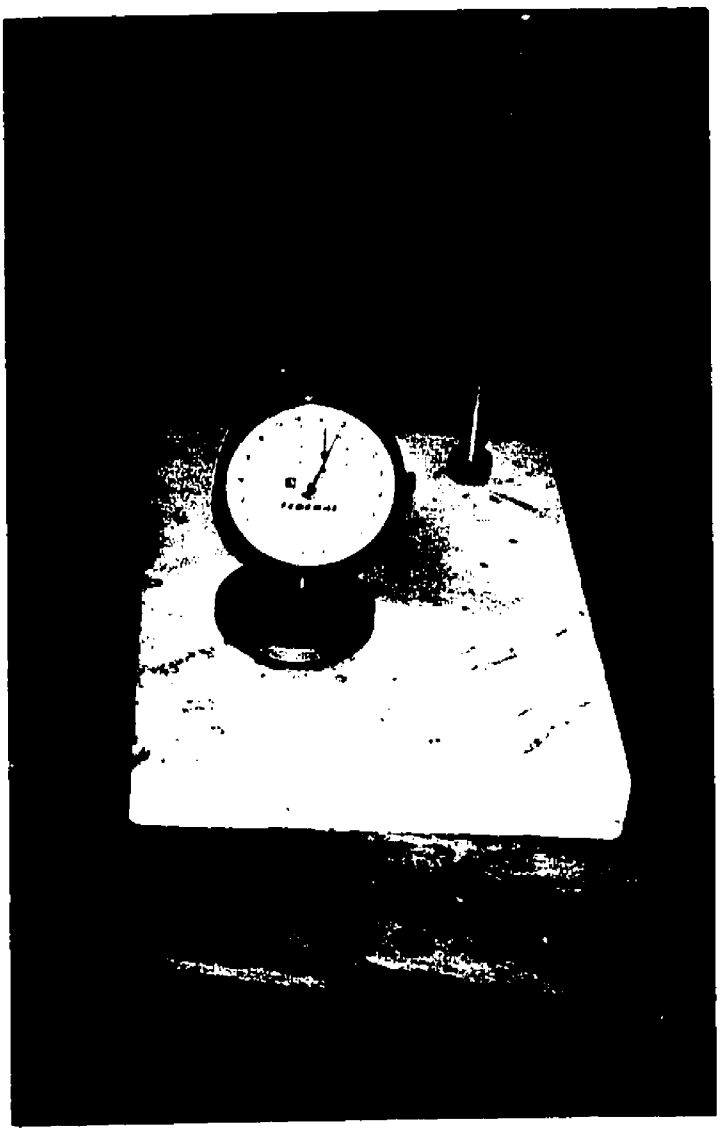


Figure 3.5 Appareillage de mesures de l'épaisseur des géotextiles étudiés

la compressibilité des géotextiles, en particulier, les aiguilletés. Un comparateur, placé au-dessus de l'échantillon, permet de lire l'épaisseur. Enfin, l'écart type et le coefficient de variation sont calculés selon la forme des équations 3.24 et 3.25.

Les tableaux 3.2 et 3.3 présentent respectivement les moyennes des masses surfaciques μ_g et des épaisseurs T_g des géotextiles A et B ainsi que leurs paramètres statistiques de l'écart type σ_t et du coefficient de variation CV.

En ce qui concerne μ_g, les mêmes ordres de grandeurs sont observés pour les deux produits; elle varie de 122 à 415 g/m^2 pour les géotextiles A et de 128 à 437 g/m^2 pour les produits B. Dans ces deux intervalles, les coefficients de variation CV diminuent avec l'augmentation de μ_g; autrement dit, plus les géotextiles sont lourds, plus ils sont homogènes. La même remarque peut être avancée si on compare les géotextiles A1 et A4 avec respectivement B1 et B2 qui ont des masses surfaciques sensiblement égales.

Dans le tableau 3.3, les épaisseurs T_g des 6 géotextiles étudiés varient de 1.3 à 4.1 mm ce qui les place dans les intervalles des épaisseurs généralement observées des géotextiles non tissés aiguilletés (en comparaison avec le tableau 2.1 de Rigo et al., 1990). On remarque que les coefficients de variation augmentent avec T_g croissant; cette variation montre que plus les produits sont épais, plus il est difficile d'avoir une valeur de T_g représentative. Ceci est justifié par le fait que les non tissés aiguilletés sont très compressibles contrairement aux thermoliés étudiés par Lombard (1985) où CV

Tableau 3.2 Masses surfaciques des géotextiles étudiés

Géotextiles	μ_g (g/m2)	σ_x (g/m^2)	CV (%)
A1	122	7.48	6.13
A2	201	11.82	5.86
A3	303	18.06	5.96
A4	415	19.87	4.79
B1	128	7.74	6.05
B2	437	16.91	3.87

Tableau 3.3 Épaisseurs des géotextiles étudiés

Géotextiles	T_g (mm)	σ_x (mm)	CV (%)
A1	1.3	0.134	10.31
A2	1.9	0.212	11.16
A3	3.2	0.44	13.75
A4	4.1	0.58	14.15
B1	1.4	0.138	9.86
B2	3.5	0.448	12.81

diminuait avec T_g croissant. Par ailleurs, pour à peu près les mêmes épaisseurs (A1, B1 et A4, B2), les coefficients CV des géotextiles B sont inférieurs à ceux provenant de la compagnie A.

Enfin, et d'une façon générale pour les géotextiles non tissés aiguilletés, plus l'épaisseur est élevée, plus la masse surfacique est grande (fig. 3.6)

b) Porosité n

Elle est calculée en fonction de μ_g, T_g et de la masse volumique des fibres ρ_f selon la relation 2.1. Les valeurs de μ_g et de T_g considérées sont les moyennes respectives mesurées comme indiqué ci-dessus. Le tableau 3.4 montre les valeurs de n très élevées qui sont toutes supérieures à 90 % sauf le géotextile B2 dont la valeur est de 0.89. Les valeurs obtenues des porosités très élevées sont caractéristiques des géotextiles non tissés aiguilletés et c'est ce qui a justifié leur choix dans notre programme de recherche. On remarque dans le tableau 3.4 une légère diminution de n avec l'augmentation de la masse surfacique.

c) Diamètre des fibres d_f

Dans les filtres fibreux comme les géotextiles, la structure de base est la fibre. Si la nature de la fibre est fondamentale dans la résistance des textiles aux agents chimiques et à la température, sa dimension est aussi très importante dans les aspects de rétention. En ce qui concerne la nature des fibres, nous avons vu que la connaissance de la masse

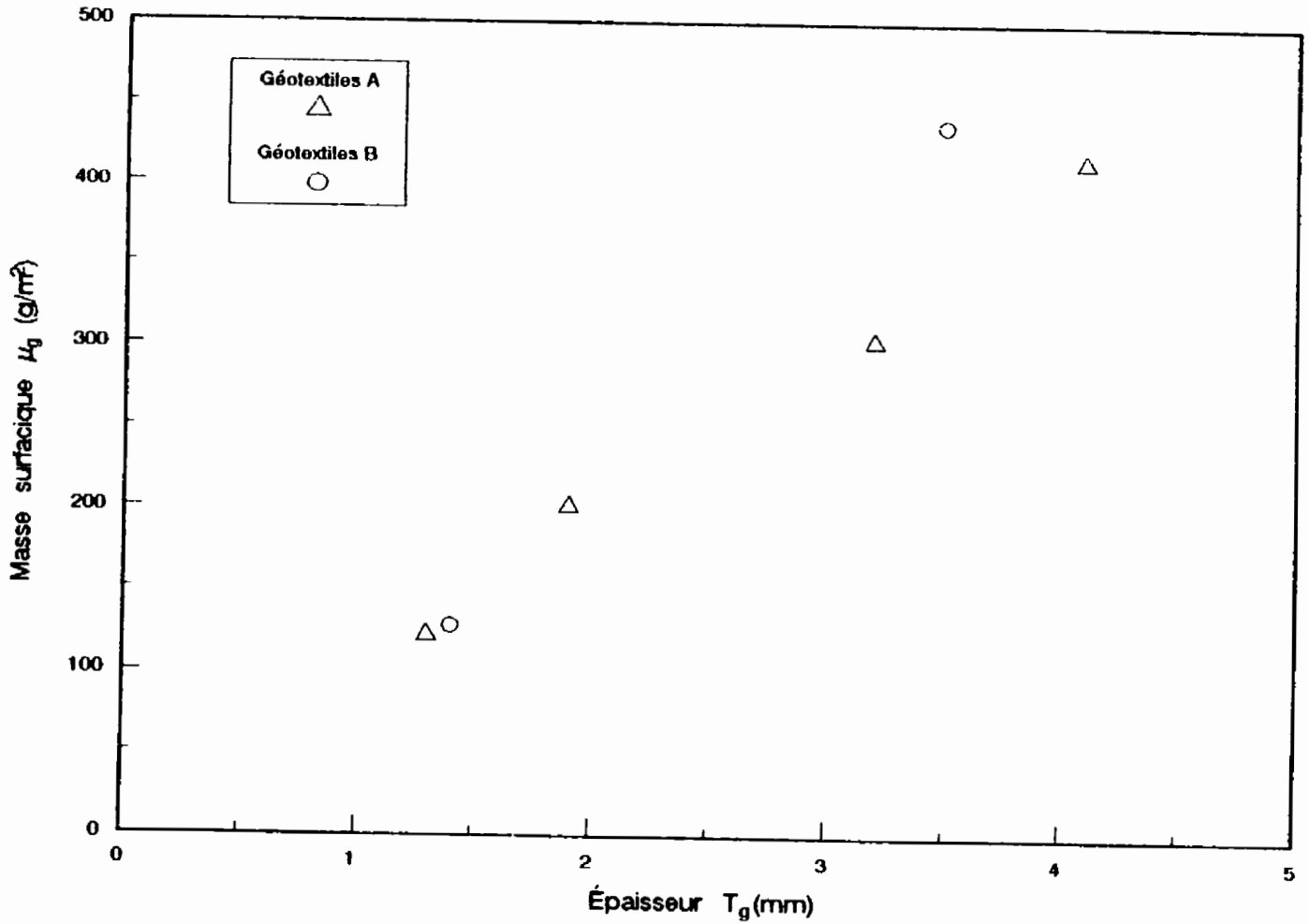


Figure 3.6 Variation de la masse surfacique en fonction de l'épaisseur des géotextiles étudiés

Tableau 3.4 Caractéristiques physiques des géotextiles étudiés

Géotextiles	T_g (mm)	μ_g (g/m^2)	d_f (μm)	ρ_f (kg/m^3)	n	ρ_g (kg/m^3)	FOS (μm)
A1	1.3	122	23.5	1380	0.9320	93.85	148
A2	1.9	201	23.5	1380	0.9233	105.79	130
A3	3.2	303	23.5	1380	0.9314	94.69	125
A4	4.1	415	23.5	1380	0.9266	101.22	78
B1	1.4	128	25	1145	0.9201	91.43	141
B2	3.5	437	25	1145	0.8910	124.86	67

volumique est requise pour estimer la porosité. Ce paramètre est fourni par les fabricants de géotextiles. Les fibres des quatre géotextiles provenant de la compagnie A sont longues et constituées de polyester (PET) de masse volumique égale à 1380 kg/m^3 tandis que celles provenant de la compagnie B sont courtes et fabriquées de 50 % de fibres en polyester et 50 % de fibres en polypropylène (PP); la masse volumique moyenne ρ_f est de 1145 kg/m^3.

Le diamètre des fibres est de l'ordre de quelques dizaines de microns et son évaluation est faite par mesure directe sur photographies prises au microscope électronique à balayage. Ce dernier, disponible au laboratoire de génie métallurgique, (CM)^2, de l'École Polytechnique, est un microscope de marque JSM-820 (fig. 3.7) ayant une résolution de 3.0 nm et permet des observations très stables à basse tension. Il est muni d'un spectromètre à rayon-X à sélection d'énergie permettant le contrôle du faisceau d'électrons et la caractérisation assistée par ordinateur de la composition chimique et de la mesure des dimensions de détails aussi petits que 0.2 μm. Pour plus de détails concernant cet appareil, le lecteur est orienté sur le manuel d'utilisation du MEB JSM-820 disponible au laboratoire de (CM)^2.

L'échantillon de géotextile vierge ou colmaté est saturé avec de la résine époxy fluide; ce qui permet d'effectuer, après solidification, une coupe normale au plan de la nappe fibreuse qui doit être bien polie avant observation. Les diamètres des fibres obtenus des géotextiles A sont égaux à 23.5 μm (fig. 3.8) tandis que les géotextiles B sont

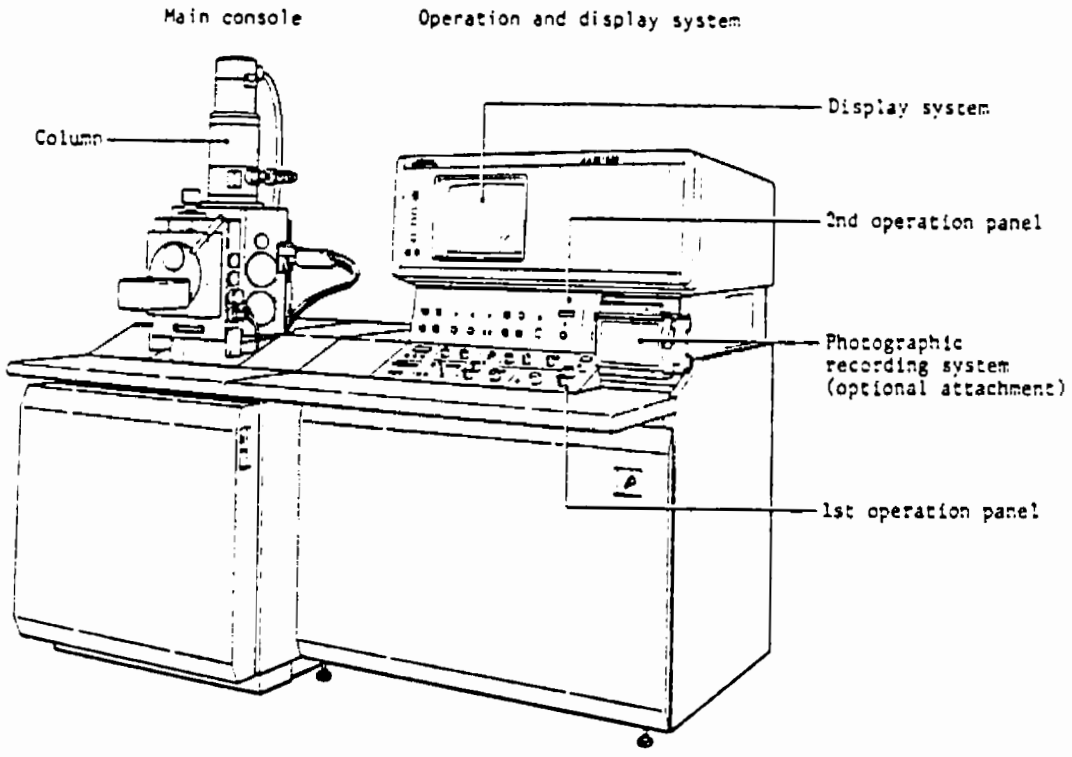


Figure 3.7 Microscope électronique à balayage JSM-820

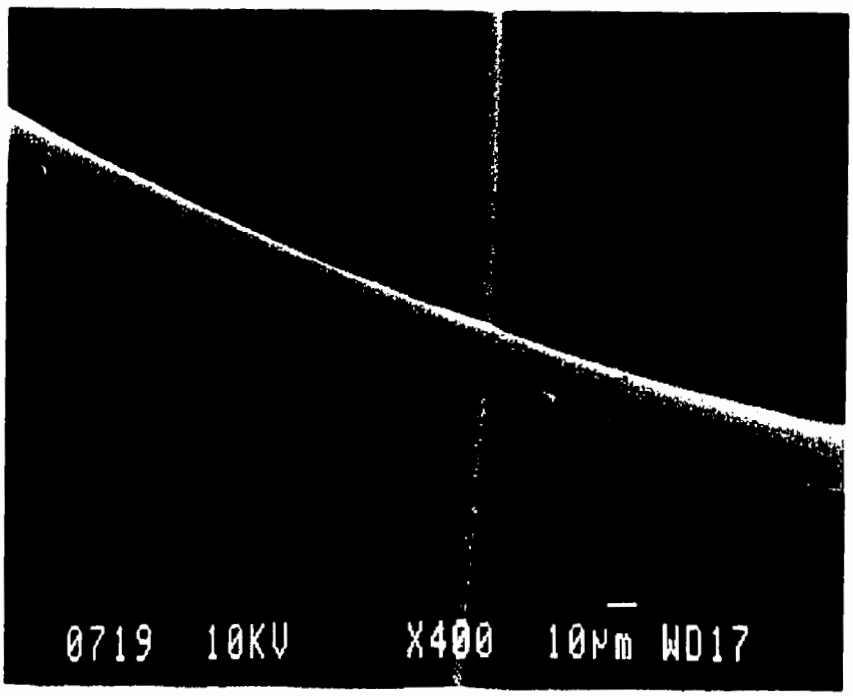


Figure 3.8 Mesure de d_f par visualisation microscopique en plan d'un géotextile A

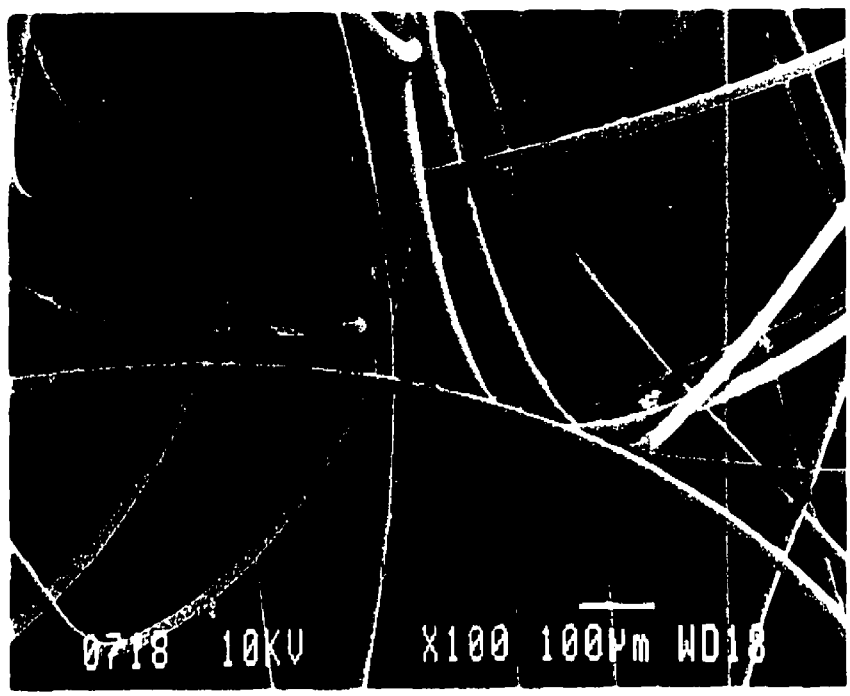


Figure 3.9 Mesure de d_f par visualisation microscopique en plan d'un géotextile B

caractérisés par un d_f d'environ 25 μm (fig. 3.9).

3.3.2.2 Mesure des ouvertures de filtration FOS

Nous avons mesuré ce paramètre par tamisage hydrodynamique disponible au laboratoire de GEOSEP. Le principe de cet appareil obéit à la méthode développée par Fayoux (1977) qui consiste à mesurer le FOS à partir de la courbe granulométrique des passants à travers le géotextile sous des actions hydrodynamiques. L'utilisation des billes de verre est recommandée au Canada par les normes CAN/CGSB-148.1-10 et elle est bien justifiée à cause de leur forme sphérique qui empêche les phénomènes d'agglomération des particules.

L'appareil utilisé (fig. 3.10 et 3.11) consiste en quatre cylindres identiques en plastique (1) ayant un diamètre de 31 cm et une hauteur de 31 cm. Ces cylindres sont fixés à un chassis métallique (2) fixé lui même à une barre métallique se déplaçant verticalement à l'aide d'un système pneumatique (3) permettant aux cylindres des alternances d'immersion dans l'eau et d'émersion dans l'eau des bassines (7). Le géotextile (4) est placé entre deux grilles maillées (5) de 10 cm d'ouverture qui sont fixées à la base de chaque cylindre. Un rebort (6) permet d'éviter les fuites de particules de billes de verre. Le "compteur" électronique (8) permet de fixer le nombre de cycles immersion-émersion généralement égal à 1000 d'après les recommandations canadiennes citées ci-dessus.

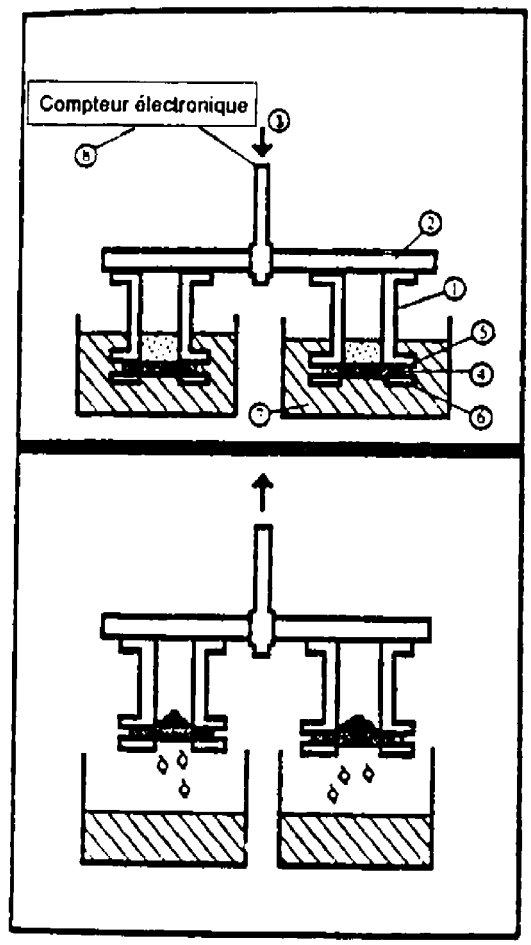


Figure 3.10 Principe de fonctionnement du tamisage hydrodynamique

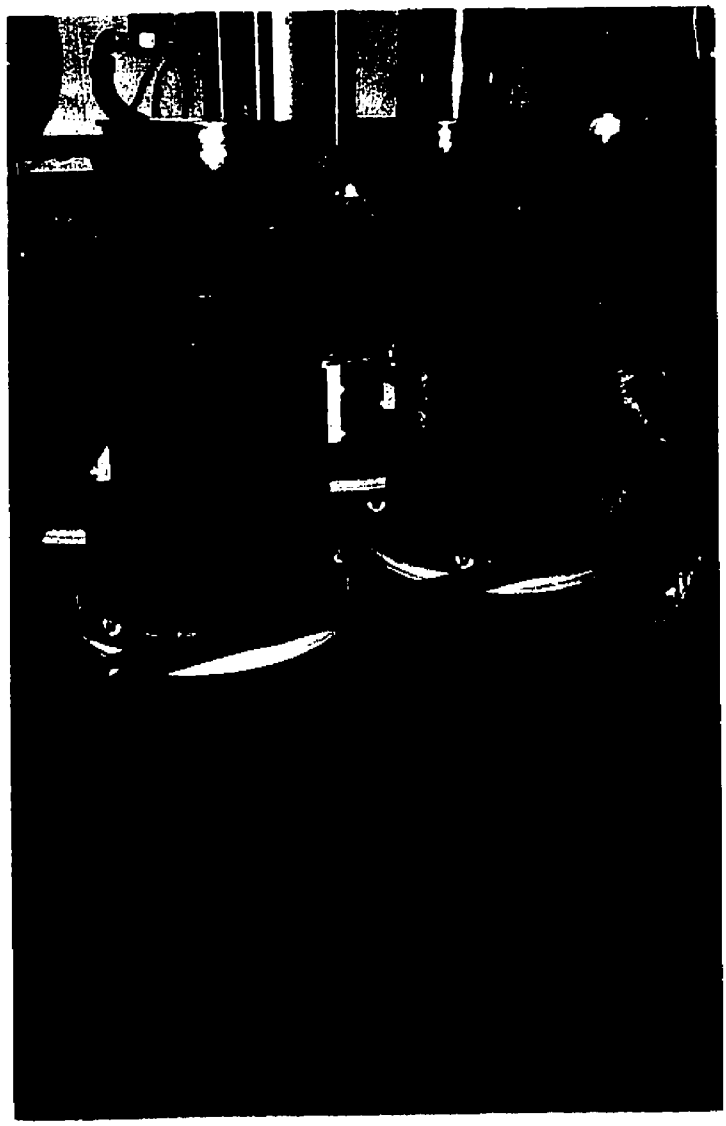


Figure 3.11 Appareillage de tamisage hydrodynamique

La quantité nécessaire des billes de verre est placée sur chaque géotextile et le niveau d'eau dans les bassines est tel que la base des cylindres (échantillon de géotextile) est immergée à une hauteur de 10 cm. Le "compteur" électronique, permettant de fixer le nombre de cycle, est actionné après que le chassis est ramené à sa position supérieure. À la fin de l'essai, au moins 50 g de billes de verre doivent passer à travers le géotextile pour pouvoir déterminer leur granulométrie. La valeur de FOS est le diamètre d_{95} tel que 95 % des billes ont un diamètre inférieur à d. En ce qui concerne les dimensions des billes de verre, il n'y a pas de granulométrie fixée quant au choix de la fraction à utiliser mais il est recommandé que le diamètre maximum des billes soit plus grand que deux fois l'ouverture attendue. Mlynarek et al. (1993) ont montré que les fractions ayant un coefficient d'uniformité C_u (égal à d_{60}/d_{10}) compris entre 5 et 8.5 et des diamètres maximum entre 300 et 800 μm n'ont pas d'influence sur les FOS mesurées. Nous avons réalisé les essais de tamisage hydrodynamique avec une fraction de billes de verre ayant un C_u égal à 5 et un d_{max} de 500 μm.

Pour chaque géotextile, 4 échantillons sont testés et la valeur de FOS retenue est la moyenne des 4 valeurs mesurées. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.4 et les courbes granulométriques des passsants sont présentées dans les figures 3.12 à 3.17. Ces dernières montrent, pour les géotextiles A, une excellente reproductibilité des résultats, ce qui justifie une homogénéisation de ces produits en terme d'ouverture de filtration. Cette tendance n'est qu'à moitié observée pour le géotextile B2 (fig. 3.17) où les valeurs mesurées de FOS sont dispersées, du moins en ce qui concerne un échantillon qui voit

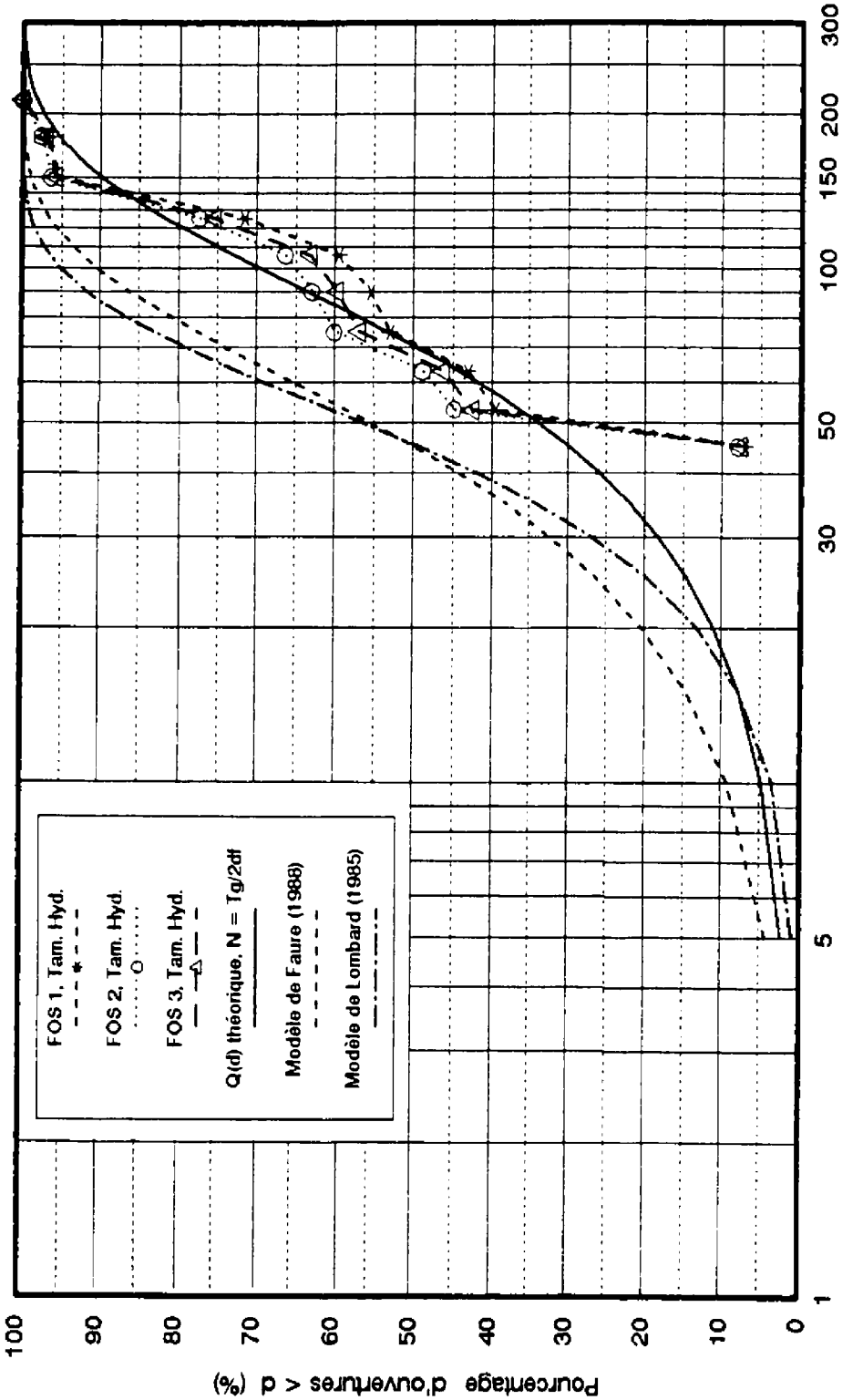


Figure 3.12 Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées.
Géotextile A1

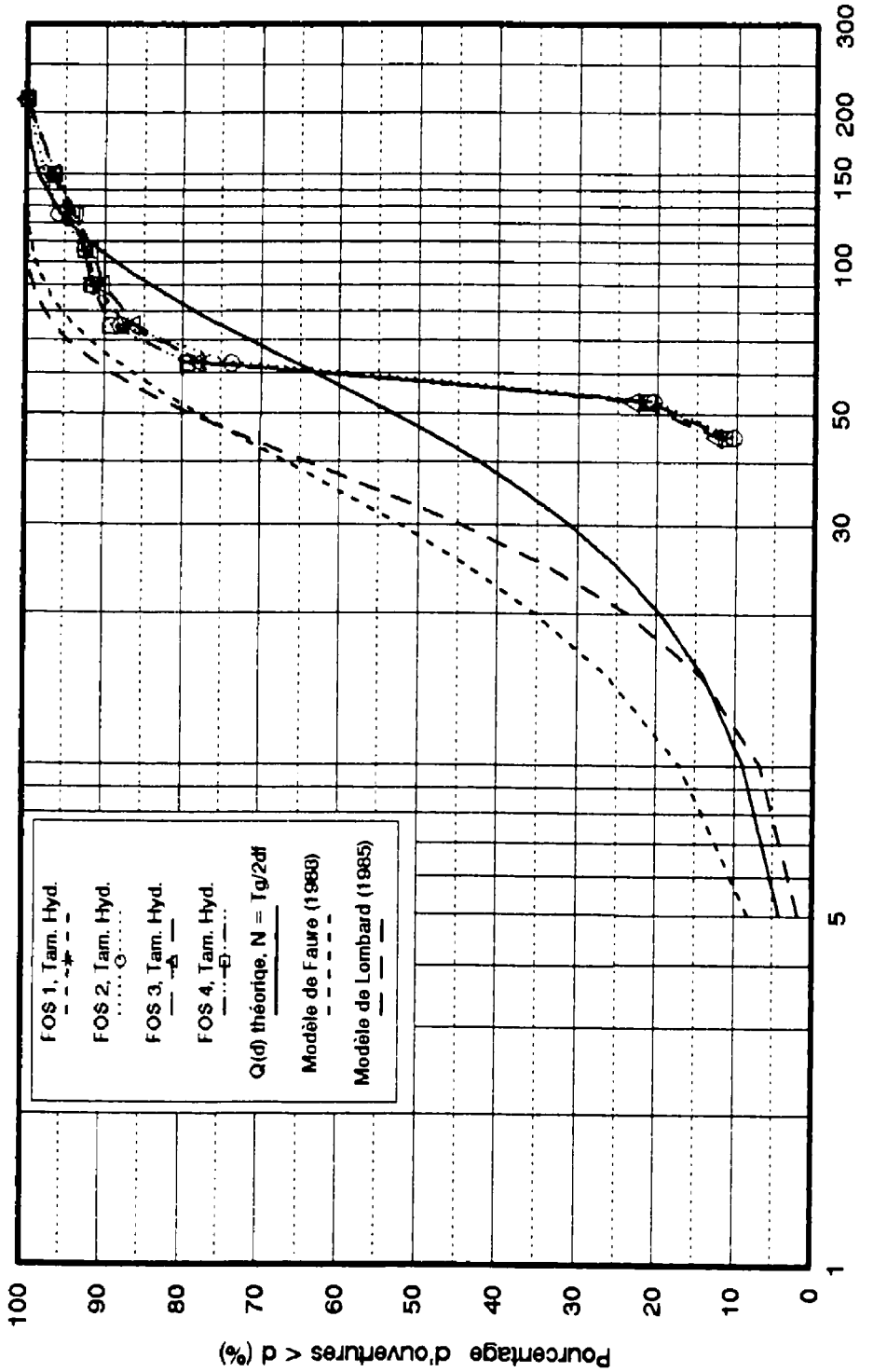


Figure 3.13 Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile A2

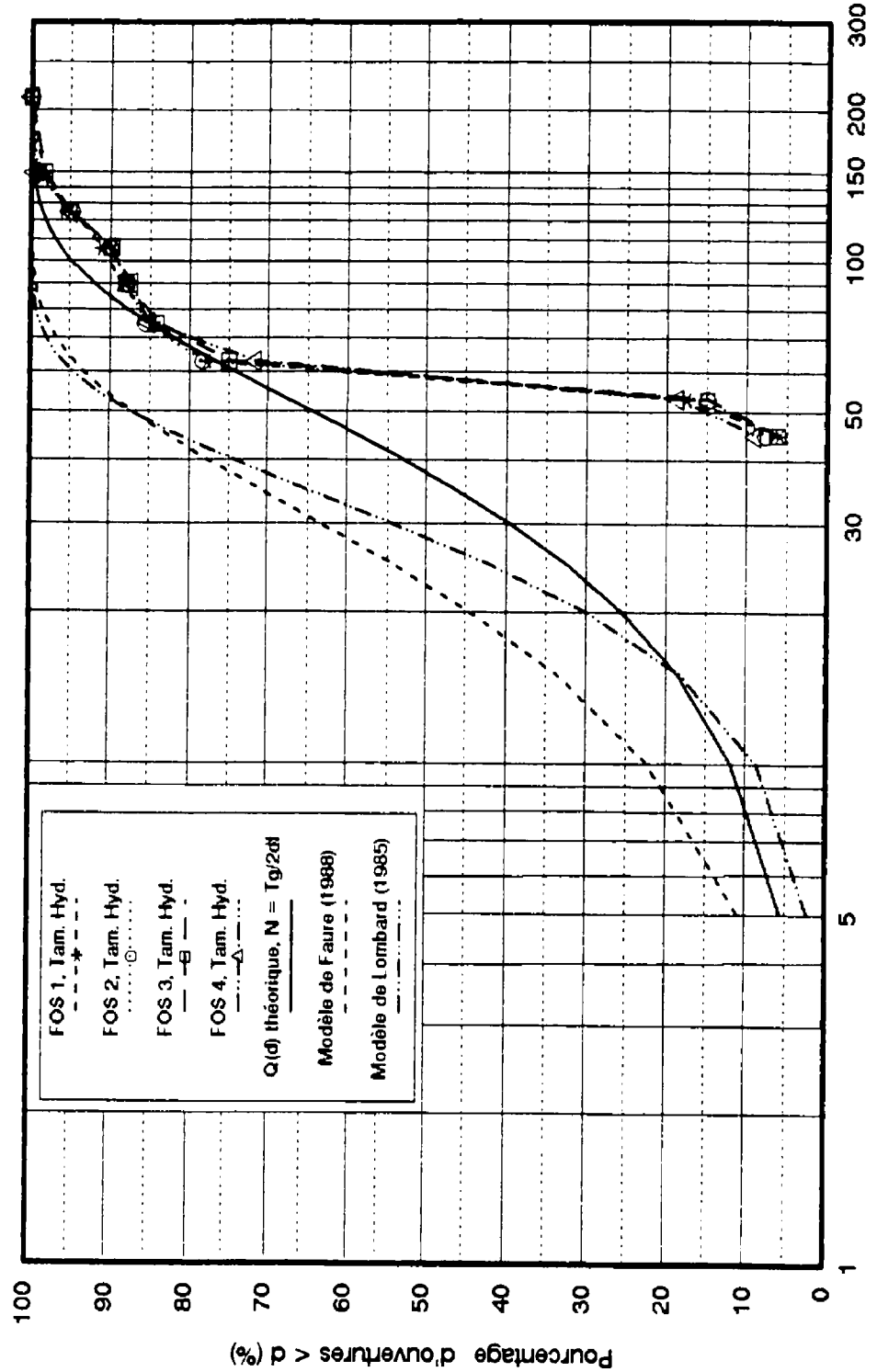


Figure 3.14 Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile A3

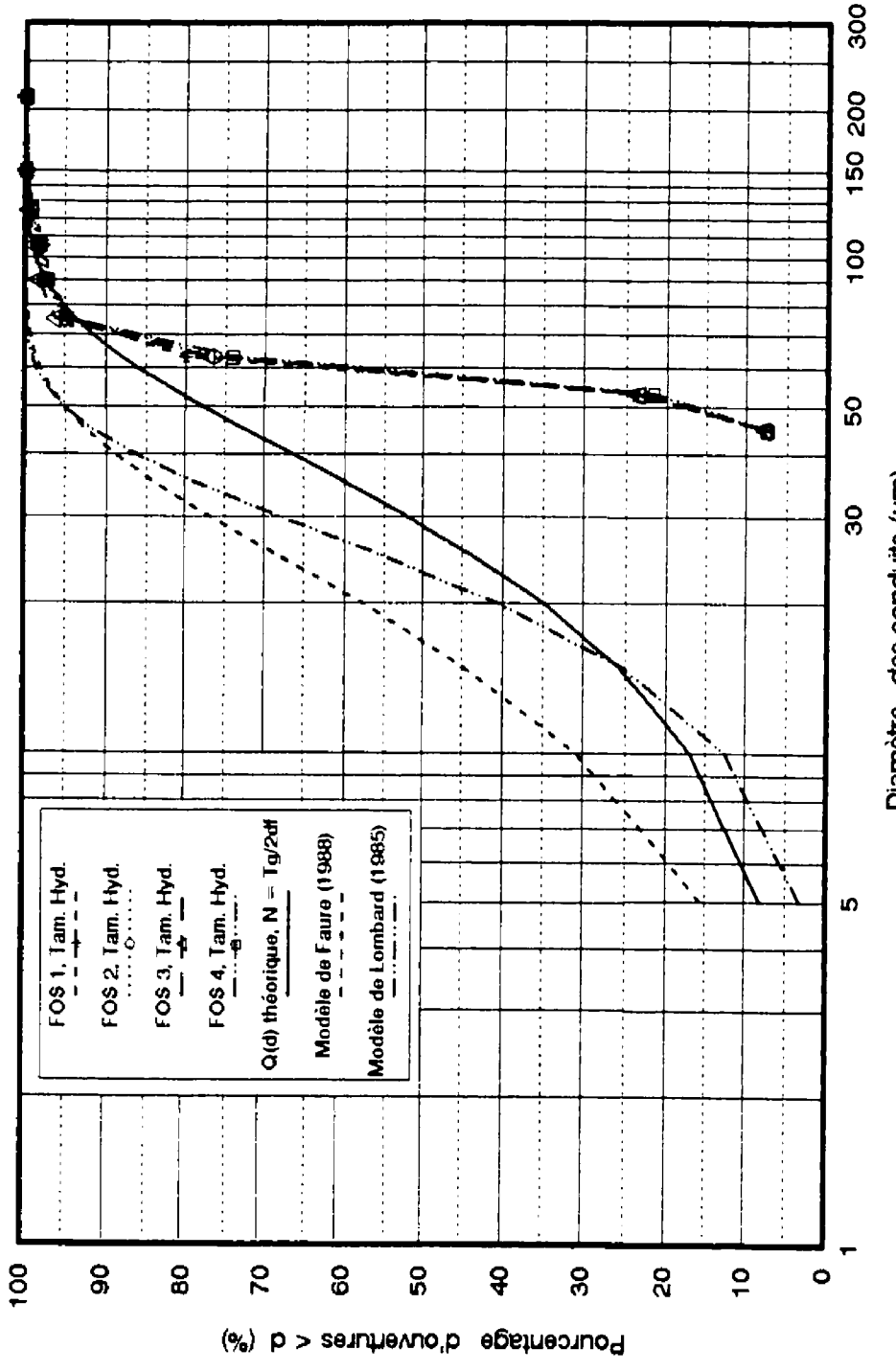


Figure 3.15 Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile A4

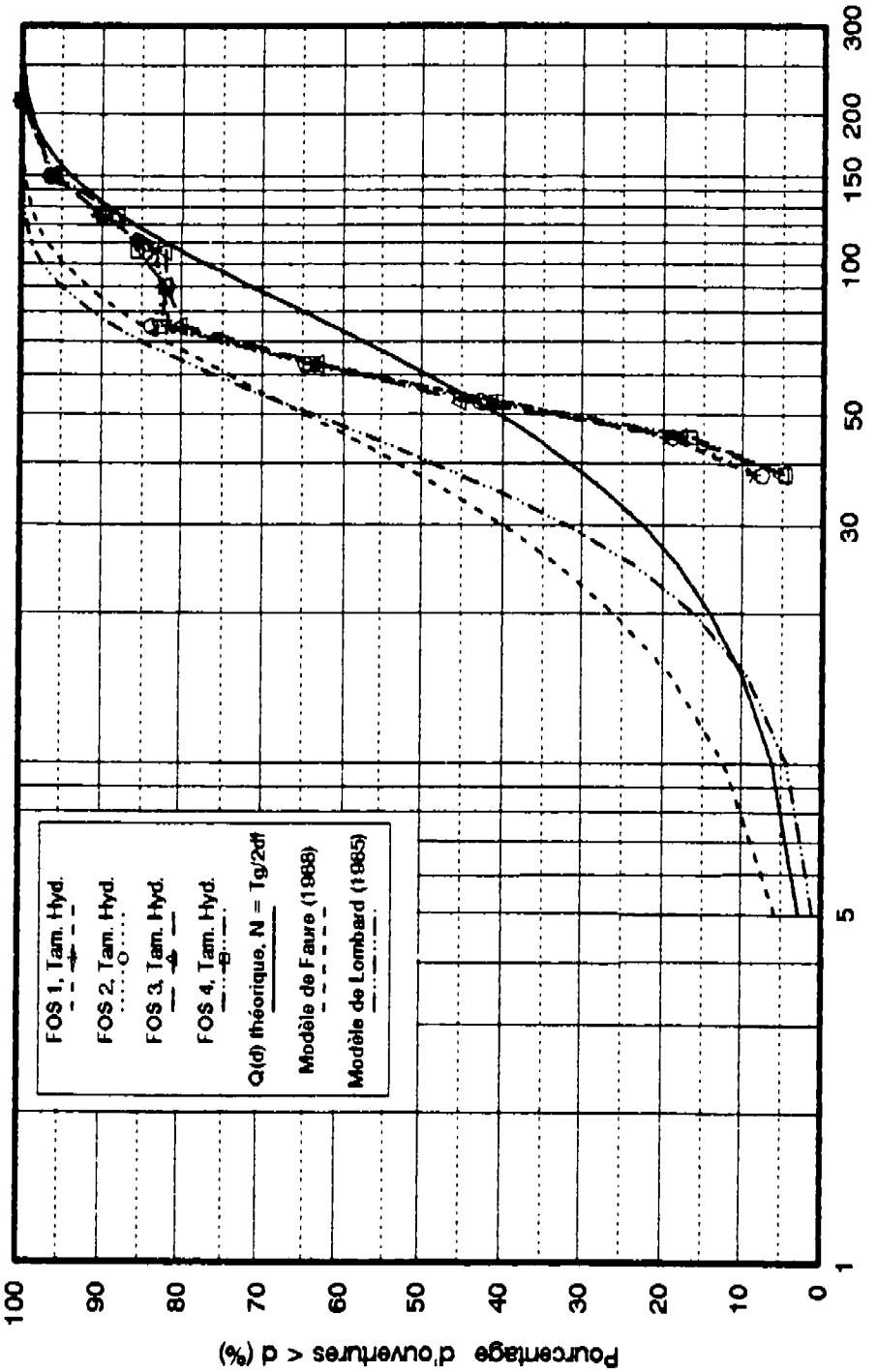


Figure 3.16 Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile B1

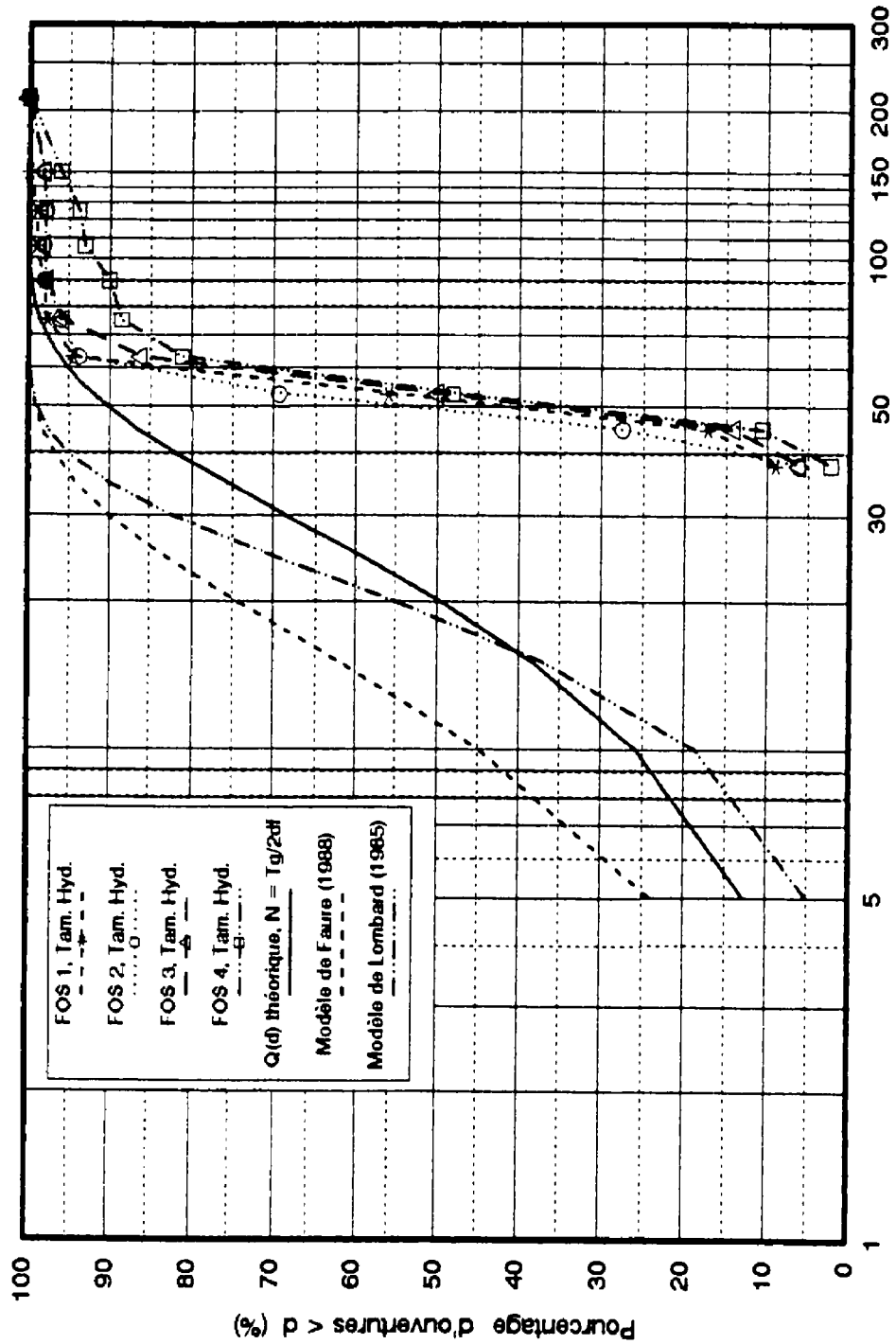


Figure 3.17 Comparaison des modèles de structure avec les FOS mesurées, Géotextile B2

son FOS égal à 140 μm alors que celui des 3 autres varie entre 64 et 74 μm avec une moyenne d'environ 67 μm. La moyenne des quatre mesures sur B2 donne un FOS égal à 86 μm. Pour la suite de l'exposé, on considère la valeur de 67 μm pour le FOS de B2.

L'ouverture de filtration des géotextiles étudiés est comprise entre 67 et 148 μm (tab. 3.4) et sa diminution avec l'augmentation de la masse surfacique (fig. 3.18) est conforme aux résultats des non tissés aiguilletés obtenus et établis dans la littérature (Mlynarek et al. 1993, Rollin et al. 1990 b, Faure 1988).

3.3.3 Vérification du modèle de structure

Nous avons vu au paragraphe précédent que le tamisage hydrodynamique avec des billes de verre, recommandé au Canada, donne une excellente reproductibilité des résultats sur les mêmes échantillons de géotextile. Nous allons comparé ces résultats avec ceux obtenus avec le modèle de structure Q(d) donnant l'ouverture des conduits théorique C_{95} correspondant au diamètre tel que 95 % des conduits ont un diamètre inférieur à C_{95} ($Q(C_{95}) = 0.95$). Dans les figures 3.12 à 3.17, ces résultats sont confrontés avec ceux obtenus par les modèles de structure de Faure (1988) et de Lombard (1985). On remarque que le modèle établi ci-dessous avec $N = T_t/2d_f$ colle relativement bien avec les granulométries obtenues par tamisage hydrodynamique. On voit que l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales tend à augmenter avec les diamètres d'ouverture plus petits. Cet écart devient encore plus important avec des structures moins ouvertes

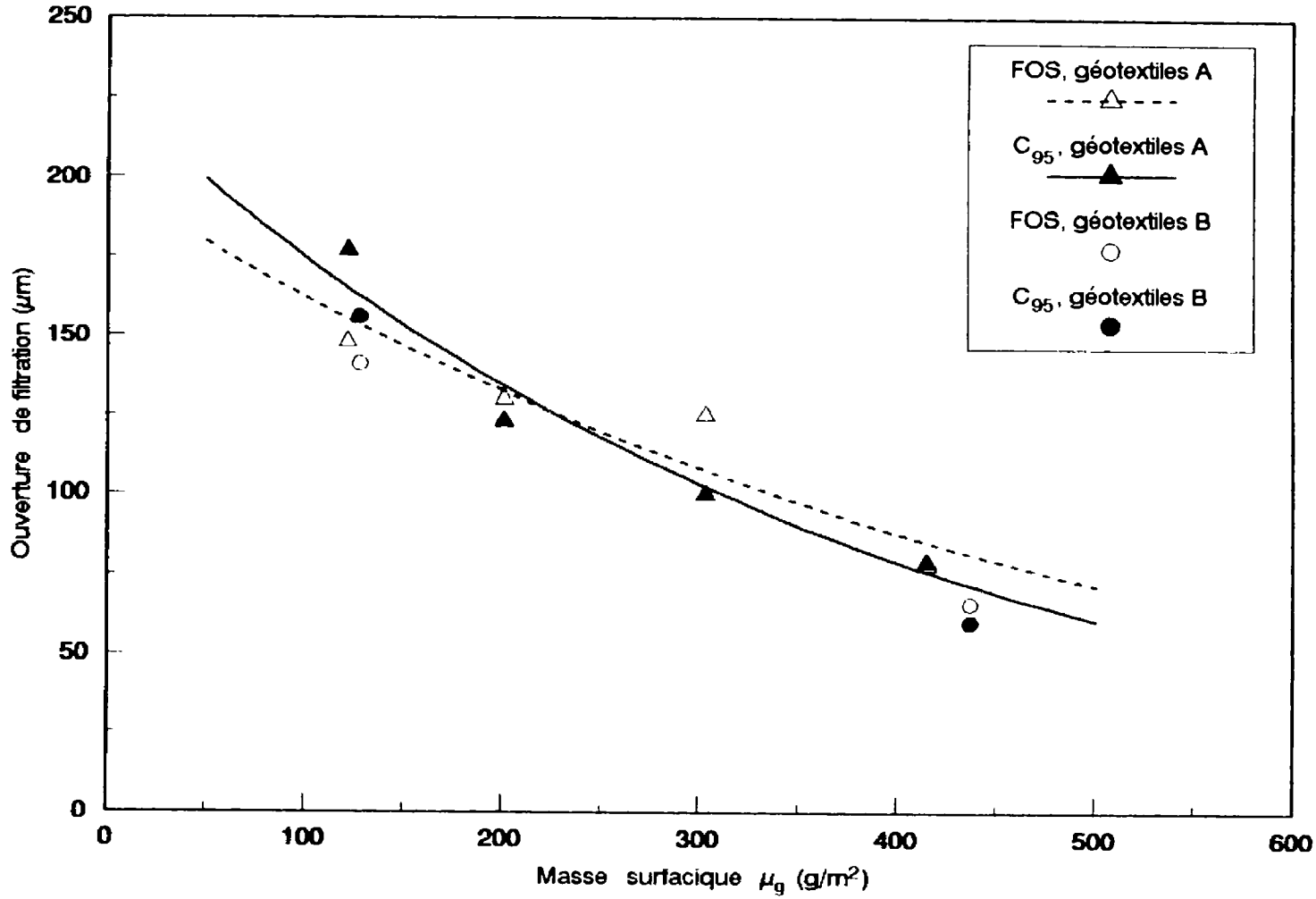


Figure 3.18 Variation de l'ouverture de filtration en fonction de la masse surfacique des géotextiles étudiés

comme les géotextiles A4 et B2 (FOS = 78 et 67 μm). Cet écart est justifié par le fait que, lors de l'opération de tamisage à sec des billes de verre obtenues après tamisage hydrodynamique, plus les géotextiles sont moins ouverts (de A1 à A4), plus les grosses particules sont retenues et plus le pourcentage de fines, obtenus après tamisage, est élevé. L'opération de tamisage à sec de fines particules ne se fait pas sans difficulté. En effet, il y a une perte importante de ces particules qui s'accumulent entre les mailles des tamis 45 et 53 μm utilisés; ce qui explique les faibles valeurs des pourcentages de fines obtenus.

Pour les géotextiles A, les ouvertures théoriques sont, en général, légèrement inférieures aux ouvertures de filtration FOS mesurées avec des variations relatives comprises entre 1.2 % pour A4 (C_{95} = 79 μm et FOS = 78 μm) à 16 % pour A1 (C_{95} = 177 μm et FOS = 148 μm). Les modèles de Faure (1988) et de Lombard (1985) appliqués à nos géotextiles donnent des différences relatives très élevées, variant respectivement de 10 à 36 % et de 32 à 45 %. Il faut rappeler que le modèle de Lombard a été établi pour des géotextiles non tissés thermoliés et les écarts relatifs observés sur ses matériaux entre les FOS mesurées et les ouvertures théoriques (notées d_{95} par cet auteur) variaient entre 10 et 40 %. Les différences relatives observées par Faure (1988) sur des géotextiles non tissés aiguilletés et thermoliés variaient respectivement entre 3 et 23 % et entre 44 et 57 %. Nous voyons donc que notre modèle théorique de structure des géotextiles non tissés aiguilletés étudiés donne des résultats beaucoup plus près de ceux observés expérimentalement, du moins en terme de paramètres d'ouverture tel que défini par la

notion d'ouverture de filtration.

En ce qui concerne les géotextiles B, le modèle de structure Q(d) donne un C_{95} = 156 μm pour B1 (fig. 3.16) comparativement à un FOS mesuré de 141 μm et un écart relatif de 9 %, ce qui est très acceptable. Cet écart est de 30 % pour le géotextile B2. Cependant, il faut noter qu'un seul échantillon de B2, parmi les 4, a un FOS relativement très élevé (= 140 μm) (fig. 3.17) et la moyenne des 3 autres n'est que de 67 μm; ce qui fait diminuer largement l'écart relatif de 30 à 10 % (entre C_{95} = 60 μm et FOS = 67 μm).

La figure 3.18 montre les variations des ouvertures théoriques et expérimentales en fonction de la masse surfacique μ_s. D'une façon générale, plus μ_s augmente, plus l'écart entre les ouvertures théoriques et mesurées diminue, ce qui est conforme aux résultats observés dans la littérature.

En conclusion, nous pouvons dire que le modèle théorique de structure établi ci-dessus colle relativement bien avec les ouvertures de filtration obtenues par l'essai de tamisage hydrodynamique. Ce modèle sera utilisé dans ce qui suit pour la simulation de l'essai de filtration des suspensions afin de pouvoir prédire l'efficacité de filtration E.

3.4 Simulation de la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés

Nous avons vu au paragraphe précédent que le modèle théorique des polyèdres poissoniens à deux dimensions appliqué aux géotextiles non tissés aiguilletés donne des ouvertures de conduits très comparables aux ouvertures de filtration mesurées au tamisage hydrodynamique. Nous allons utiliser ce modèle pour l'établissement d'un modèle de simulation d'un essai de filtration de suspensions. Cette simulation permet de déterminer pour un sol en suspension donné, l'évolution en fonction du temps, du pourcentage de passants Pa des particules de sol à travers les filtres géotextiles étudiés; il permet par conséquent, l'estimation de l'efficacité de filtration E. Aussi, cette simulation donne la distribution granulométrique après filtration du sol obtenu. Cette dernière est notée Gr(d).

3.4.1 Probabilité de passage d'une particule

Afin de simuler le passage des particules au travers d'une nappe fibreuse, il faut déterminer la probabilité de passage d'une particule à travers les pores. Les conditions de passage de cette particule de diamètre d à travers une surface fibreuse contenant des vides de dimension et de forme variables sont (Faure, 1988):

- le centre de la particule arrive dans un vide,
- le cercle inscrit dans ce vide doit avoir un diamètre supérieur à d,
- le centre de la particule est à une distance supérieure ou égale à d/2 du bord du vide.

Si cette surface est une nappe élémentaire de porosité surfacique n^*, la probabilité de passage à travers cette nappe est:

$$P_e(d) = n^*(1 - G(d)) \qquad (3.26)$$

avec G(d) la granulométrie (ou distribution) des cercles inscrits dans les vides (équation 3.16), ou encore la probabilité d'avoir un trou dont le diamètre du cercle inscrit est inférieur à d. Dans ce cas, (1 - G(d)) sera donc la probabilité d'avoir un trou dont le diamètre du cercle inscrit est supérieur à d.

Pour les géotextiles non tissés aiguilletés, la porosité n est très élevée et souvent supérieure à 90 %. L'écart entre n et n^* est très faible, de l'ordre de 3 % pour un non tissé ayant n = 0.9. Cet écart de 3 % est évalué à partir d'une relation donnant n^* (Faure, 1988):

$$n^* = 1 - \frac{4}{\pi}(1-n) \qquad (3.27)$$

Si n = 0.9, n^* = 0.873 et $\Delta n/n = (n - n^*)/n = (0.9 - 0.873)/0.9 = 0.03 = 3$ %; cet écart devient encore plus faible si n est égale à 0.93 (de l'ordre de 2 %).

La probabilité de passage à travers la première nappe est donc:

$$P_e(d) = n(1 - G(d)) \qquad (3.28)$$

La probabilité qu'une particule traverse une couche fibreuse constituée d'un empilement de N nappes élémentaires est la probabilité $P_g(d)$ (probabilité de traverser toute l'épaisseur du géotextile):

$$P_g(d) = n(1 - G(d))^N \qquad (3.29)$$

ou encore:

$$P_g(d) = n\left[\frac{2+\sigma(d+d_f)}{2+\sigma d_f}\right]^{2N} e^{-N.\sigma.d} \qquad (3.30)$$

avec:

$$N = \frac{T_g}{2d_f}$$

et:

$$\sigma = \frac{4(1-n)}{\pi . d_f}$$

3.4.2 Modèles théoriques de la simulation

Le principe d'une filtration de suspension contenant des particules de sol est basé sur le fait que les particules arrivent individuellement au filtre. Ceci suppose que les phénomènes d'interaction entre particules sont négligeables, encore moins la floculation

des particules favorablement susceptibles à ce genre de situation (particules fines). Plus la concentration en particules solides initiale C_o à filter est faible, mieux ces conditions sont remplies. Le programme de simulation considère les hypothèses suivantes:

- faible C_o
- débit d'écoulement Q_o constant durant l'essai,
- la sédimentation des particules est négligée à l'amont du filtre dans le cas d'écoulement horizontal; autrement dit, cette hypothèse considère que la concentration C_o à l'amont du filtre est constante durant l'essai,
- la granulométrie à l'amont Gr_o est supposée linéaire en log(d) et le diamètre d est compris entre un minimum d_o et un maximum d_{max}. Les particules de sol ont un poids volumique égal à γ_s (ou une densité G_s),
- le sol retenu à l'intérieur est uniformément réparti à la surface de chaque nappe et le colmatage dû au piégeage des particules à l'intérieur du filtre n'influence pas le processus de la filtration pour de faibles C_0.

3.4.2.1 Pourcentage de passant Pa

Soit une suspension de concentration initiale amont C_o arrivant au filtre avec un débit Q_o. La masse de sol M qui arrive au filtre par unité de temps est:

$$M = Q_o . C_o \qquad (3.31)$$

et, après l'intervalle de temps t, la masse cumulée est égale à:

$$M(t) = Q_o . C_o . t \qquad (3.32)$$

Soient $\mu_s(t,x)$ la masse de sol de diamètre x, ayant passé à travers le géotextile à l'instant t et M(t,x), la masse de sol, de diamètre x, s'étant présenté au filtre à l'instant t:

$$\mu_s(t,x) = P_g(x) . M(t,x) \qquad (3.33)$$

d'où la masse totale des particules ayant passé après l'intervalle de temps t:

$$\mu_s(t) = \int_{d_o}^{d_{max}} P_g(x) . M(t,x)\, dx \qquad (3.34)$$

À partir de la granulométrie initiale du sol en suspension $Gr_o(x)$, la fraction de sol de diamètre x est:

$$y(x) = \frac{dGr_o(x)}{dx} \qquad (3.35)$$

et la masse de sol de diamètre x:

$$M(t,x) = M(t) \cdot y(x) \qquad (3.36)$$

d'où:

$$\mu_s(t) = M(t) \int_{d_o}^{d_{max}} P_g(x) \cdot y(x)\, dx \qquad (3.37)$$

La granulométrie $Gr_o(x)$ est de la forme:

$$Gr_o(x) = a \ln(x) + b \qquad (3.38)$$

Il s'agit d'une approximation linéaire en log(x) (Faure, 1988), transformée en ln(x), de la granulométrie du sol à filtrer.

La relation 3.37 devient:

$$\mu_s(t) = M(t) \int_{d_o}^{d_{max}} \frac{a}{x} \cdot P_g(x) \cdot dx \qquad (3.39)$$

Si M_o est la quantité de sol en suspension arrivant au filtre pendant l'intervalle de temps t, alors:

$$M_o = Q_o \cdot C_o \cdot t \qquad (3.40)$$

et le pourcentage de passant cumulé Pa, à l'instant t, est:

$$Pa(t) = \frac{\mu_s(t)}{M_o} = \frac{Q_o \cdot C_o \cdot t}{Q_o \cdot C_o \cdot t} \int_{d_o}^{d_{max}} \frac{a}{x} \cdot P_g(x) \cdot dx \qquad (3.41)$$

ou encore:

$$Pa(t) = P \qquad (3.42)$$

avec P égal à:

$$P = \int_{d_o}^{d_{max}} \frac{a}{x} \cdot P_g(x) \cdot dx \qquad (3.43)$$

ou bien:

$$P = \int_{d_o}^{d_{max}} n \cdot \frac{a}{x} \cdot \left[\frac{2+\sigma(x+d_f)}{2+\sigma \cdot d_f}\right]^{2N} e^{-N \cdot \sigma \cdot x} \cdot dx \qquad (3.44)$$

Il faut remarquer que Pa est indépendant de t et représente le pourcentage P de passant cumulé à la fin de l'essai de filtration. Dans ce cas, l'efficacité de filtration E n'est autre que le complément de P par rapport à 1 (ou à 100 %):

$$E = 1 - P \qquad (3.45)$$

Nous remarquons que ce modèle de Pa est indépendant de la concentration initiale C_o (mais toujours dans les conditions de faibles C_o) et du débit d'écoulement (ou vitesse d'écoulement). Il est très important aussi de remarquer que le paramètre P (ou E) ne dépend que de la structure du géotextile (n, T_g et d_f) et de la granulométrie du sol à filtrer. Nous discuterons ci-dessous l'influence de ces paramètres sur P et E en retenant le sol utilisé dans notre programme expérimental.

3.4.2.2 Caractéristiques du sol en suspension utilisé

Il s'agit d'un sol silteux fourni par McDonald College de Saint-Anne-De-Bellevue et provenant d'un dépôt de rivière de la région sud-ouest de Montréal (Ormstown). Afin d'éliminer les particules de sable, ce sol est tamisé au tamis 200 qui correspond à une ouverture de 75 μm. La granulométrie est déterminée à partir de l'essai classique de sédimentométrie selon les normes ASTM D422-63. Le diamètre d_y correspond à y % de particules ayant un diamètre inférieur à d_y. L'autre paramètre de sol important pour l'estimation des concentrations est le poids spécifique des grains de sol γ_s (ou masse volumique ρ_s ou densité G_s). Cette dernière est déterminée selon les normes ASTM 854 et la valeur trouvée est de 2.63 g/cm^3 (Gs = 2.63).

La courbe granulométrique du sol utilisé est présentée dans la figure 3.19. Elle est convexe vers le bas et montre que 80 % des particules ont un diamètre supérieur à 18 ou 20 μm. Le diamètre maximum est égal à 75 μm (100 % de particules passent au

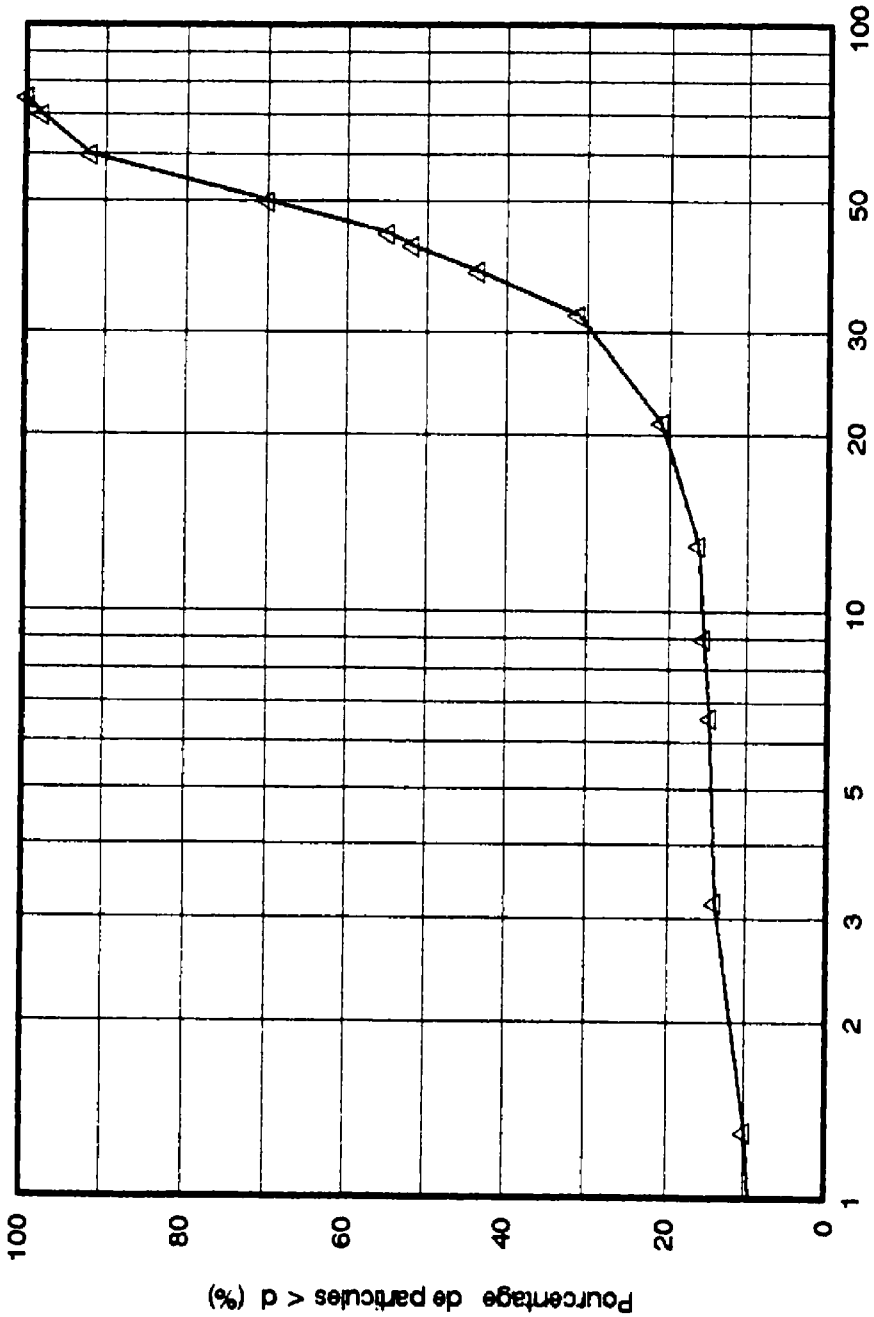


Figure 3.19 Courbe granulométrique du sol utilisé dans les suspensions

tamis 200) et le diamètre moyen d_{50} est d'environ 41 μm. La fraction argileuse inférieure à 2 μm est non moins négligeable et est égale à environ 12 %. Il serait intéressant de suivre la tendance ou la variation de cette fraction après le processus de filtration. Le diamètre minimum d_0 est de l'ordre de 0.1 μm et la forme de la granulométrie est approximée par deux droites d'équations:

- pour 0.1 μm < x < 24 μm:

$$y_1(x) = 0.04 \ln(x) + 0.06$$

et le paramètre "a" de l'équation (3.44) sera égal à 0.04

- pour 24 μm < x < 75 μm:

$$y_2(x) = 0.69 \ln(x) - 2.37, \qquad \text{avec } a = 0.69$$

Dans le but d'étudier l'influence de la distribution granulométrique sur les passants et les efficacités théoriques, la figure 3.20 présente les granulométries de deux autres sols (sol 2 et sol 3). Il s'agit d'un sol à granulométrie étalée (sol 2, C_u = 8.3) et d'un sol à granulométrie uniforme (sol 3, C_u = 2.2). Ces granulométries sont présentées dans cette figure en vue de discuter l'influence du diamètre moyen d_{50} et de leur distribution sur les paramètres du passant Pa et de l'efficacité de filtration (§ 3.4.2.4 b).

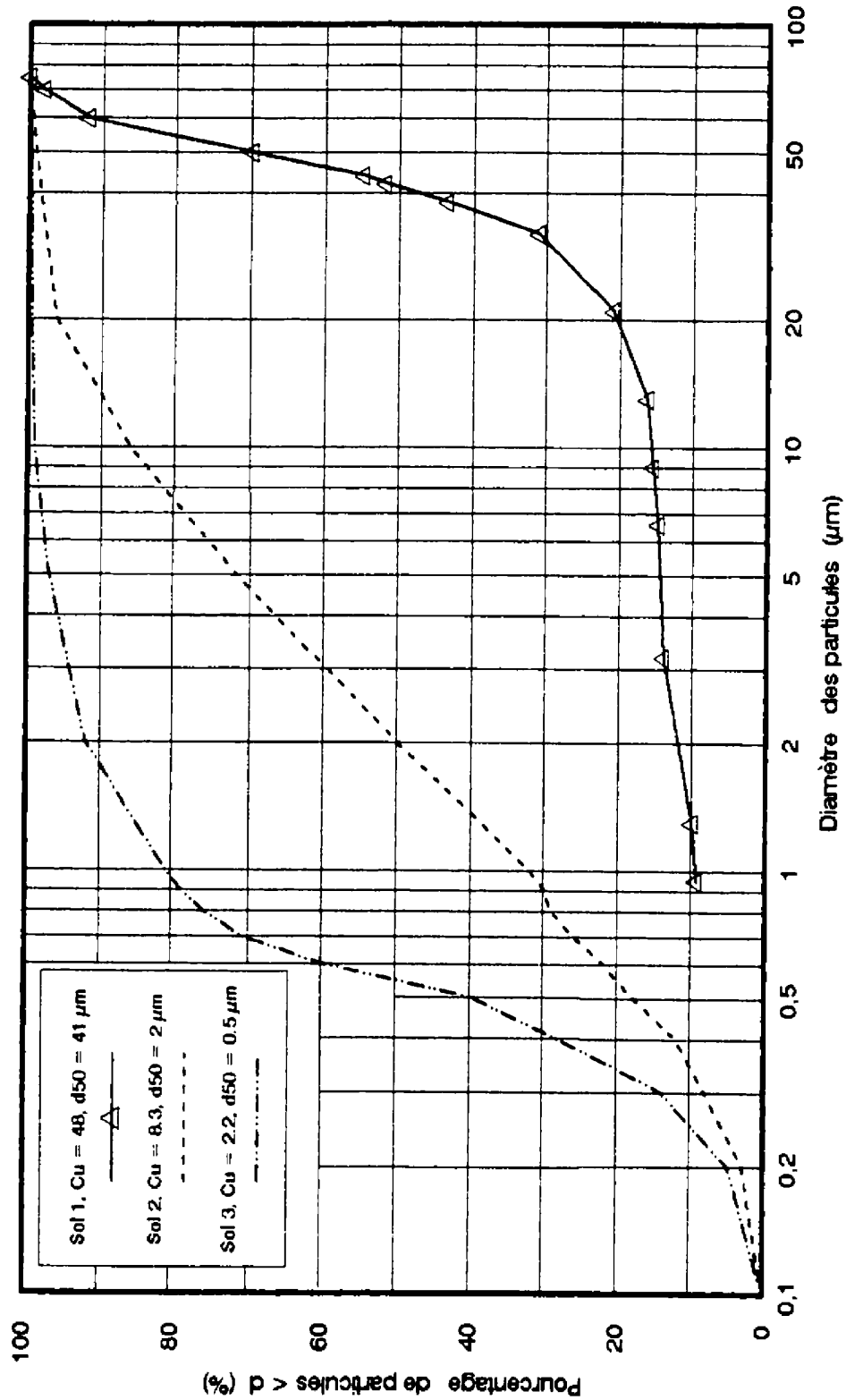


Figure 3.20 Granulométries des sols utilisés dans la simulation des essais de filtration

3.4.2.3 Résultats théoriques des passants et des efficacités

Pour chaque géotextile A et B, nous avons calculé le paramètre P (équation 3.44) à l'aide d'un programme utilisant une méthode numérique de Gauss-Jordan (Dhatt et Touzot, 1981) permettant de résoudre l'intégrale de l'équation 3.44 donnant le paramètre P. Le principe de cette méthode, beaucoup plus pratique en terme de volume de calcul, est présenté dans l'annexe I et les résultats obtenus concernant le paramètre P sont présentés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5 Pourcentages de passant cumulés et efficacités de filtration théoriques des géotextiles étudiés

Géotextiles	$C_{95}(\mu m)$	P (%)	E (%)
A1	177	72	28
A2	123	58	42
A3	100	52	48
A4	79	42	58
B1	156	67	33
B2	60	31	69

On remarque que plus les ouvertures théoriques C_{95} des conduits des géotextiles sont élevées plus le paramètre P est grand et moindre est l'efficacité de filtration E. Autrement dit, plus les filtres sont ouverts moins ils sont efficaces. Pour les géotextiles A, C_{95} varie de 79 μm pour A4 à 177 μm pour A1, ce qui donne des efficacités de

filtration E variant de 58 à 28 %. Dans la famille des géotextiles B, théoriquement B2 donne la meilleure efficacité E (69 %) comparativement à celle de B1 avec respectivement des ouvertures théoriques de 60 et 156 μm. Cependant, il faut rappeler que le filtre B2 a la plus faible porosité parmi tous les géotextiles étudiés; elle est même inférieure à 0.90. Nous verrons dans les essais de filtration réalisés sur ce matériau (chapitre 5) que cette faible porosité ne lui permet pas d'atteindre cette performance. Les résultats théoriques du tableau 3.5 seront vérifiés et discutés dans le chapitre 5, en fonction des résultats expérimentaux obtenus à partir des essais de filtration de suspensions.

Le programme de calcul, permettant d'évaluer les paramètres P et E, donne les variations de ces paramètres en fonction du nombre de nappes élémentaires pour chaque géotextile. Ainsi, au passage de chaque nappe élémentaire, on peut déduire le pourcentage de passant cumulé à travers les nappes supérieures. Autrement dit, comme le modèle de structure des géotextiles suppose l'indépendance des nappes, les variations de P et E en fonction de N sont équivalentes à des variations en terme d'épaisseurs T_g (variant de $2d_f$ à $N.2d_f$, puique l'épaisseur d'une nappe élémentaire est $2d_f$) d'un géotextile gardant les mêmes caractéristiques de n et d_f. Des pourcentages de passants, on déduit facilement, toujours pour un sol donné, le pourcentage de particules retenues au niveau de chaque nappe.

La figure 3.21 présente les résultats théoriques des passants et on remarque l'influence

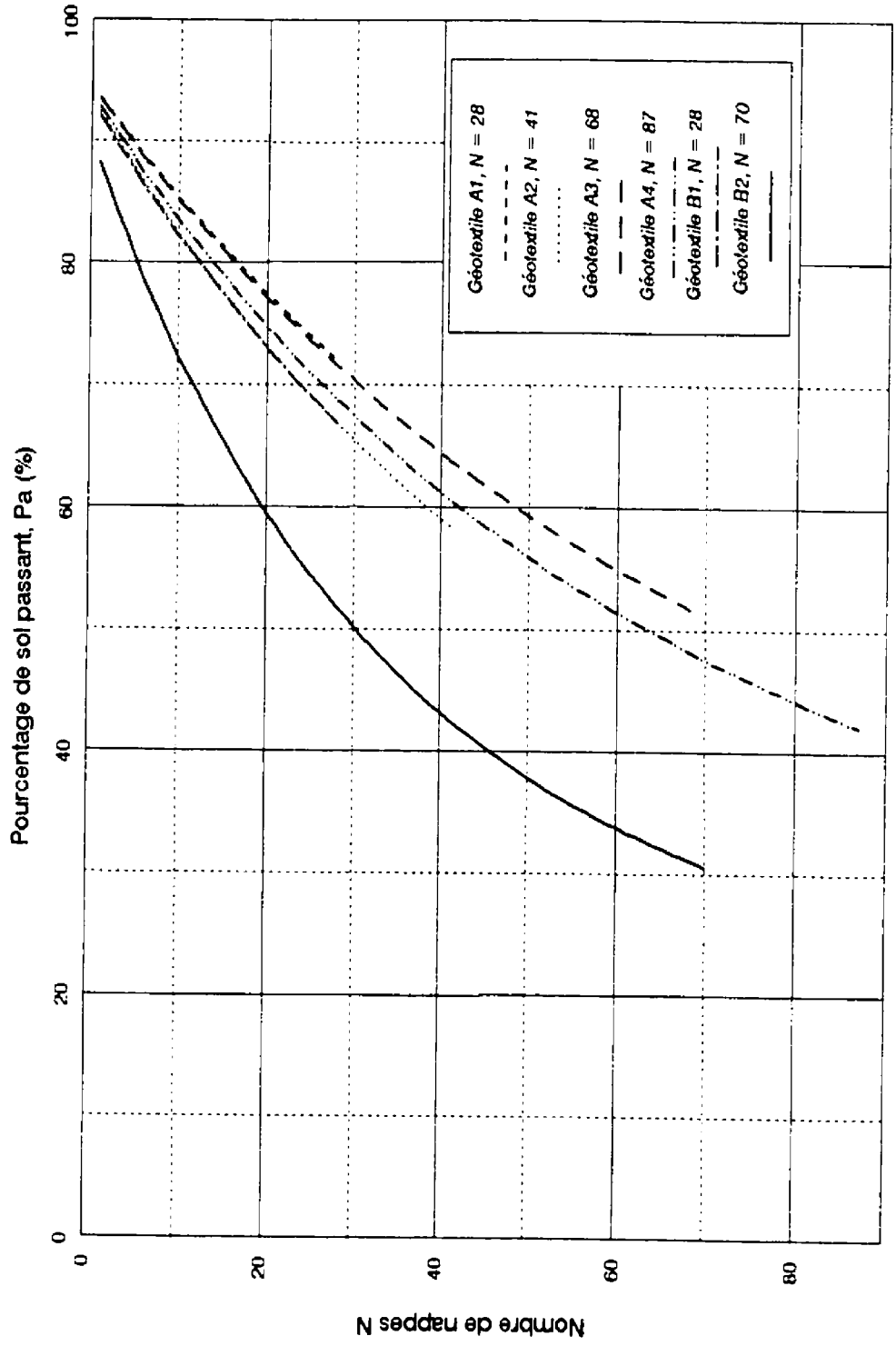


Figure 3.21 Variation du pourcentage de sol passant en fonction du nombre de nappes

très marquée de la porosité n. En effet, les courbes des géotextiles A2 et B1 se superposent jusqu'à N = 28 (épaisseur de B1); ces deux filtres sont de nature différente mais de porosité n presque égale (respectivement 0.9233 et 0.9201). Autrement dit, si le géotextile B1 avait la même épaisseur que celle de A2, on obtiendrait théoriquement la même efficacité. La même remarque est valable pour les géotextiles A1 et A3 (n égales respectivement à 0.932 et 0.9314). Ces résultats sont justifiés par le fait que, à N égal, le modèle de structure des géotextiles ne va dépendre que de n et du diamètre des fibres d_f.

3.4.2.4 Discussion

a) Influence de la porosité:

Pour un sol donné, nous avons simulé le pourcentage de passant Pa, pour un même géotextile, par exemple A2, en supposant des porosités différentes: 0.94, 0.92 et 0.90. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.6 où on remarque que le filtre à porosité n plus élevée est beaucoup plus susceptible à laisser passer les particules. À n = 0.90, l'efficacité de filtration est de 55 % (P = 45 %) et à n = 0.94, elle n'est que de 30 % (P = 70 %).

Tableau 3.6 Influence de la porosité n du géotextile A2 sur les efficacités théoriques

Porosité n	0.9	0.92	0.94
Passant P (%)	45	56	70
Efficacité E (%)	55	44	30

Tableau 3.7 Influence de la granulométrie du sol en suspension sur les efficacités théoriques, géotextile A4

Sols en suspension	C_u = 48, d_{50} = 41μm	C_u = 8.3, d_{50} = 2μm	C_u = 2.2, d_{50} = 0.5 μm
Passant P (%)	42	75	89
Efficacité E (%)	58	25	11

b) Influence de la granulométrie du sol en suspension sur les passants théoriques:

Le sol que nous avons utilisé dans notre programme expérimental a une granulométrie très étalée (fig. 3.19) caractérisée par un coefficient d'uniformité C_u ($= d_{60}/d_{10}$) égal à environ 48. Un test de simulation est réalisé avec d'autres sols ayant un C_u égal à 8.3 (granulométrie peu étalée) et à 2.2 (granulométrie uniforme) avec un diamètre moyen d_{50} respectif de 2 et 0.5 μm (fig. 3.20). Les résultats donnant P (ou Pa) et obtenus avec le géotextile A4, sont présentés dans le tableau 3.7 où on remarque que le sol ayant un d_{50} plus grand donne la meilleure efficacité (E = 58 % correspondant à P = 42 %); autrement dit, plus le diamètre des particules est élevé, plus le sol est retenu par le géotextile. On remarque aussi que plus la granulométrie du sol à filtrer est uniforme (C_u décroissant) et les particules plus fines, plus l'efficacité diminue (passant P augmente); autrement dit, plus grand est le nombre de particules ayant même diamètre (d_{60} tendant vers d_{10} c'est-à-dire C_u tend vers 1), plus la probabilité de passage est importante.

c) Influence des diamètres minimum d_0 et maximum d_{max}:

Les tableaux 3.8 et 3.9 montrent respectivement l'influence de d_{max} et d_0 sur les pourcentages de passant P à travers le géotextile A4. La simulation a été réalisée avec un sol à granulométrie uniforme C_u = 2.2 et ayant un d_{50} égal à 0.5 μm (sol très fin). On remarque que les passants théoriques ne sont pratiquement pas influencés par les valeurs de d_{max} (tab. 3.8). Par contre, le diamètre minimum d_0 a une influence très

Tableau 3.8 Influence du diamètre maximum du sol en suspension sur les efficacités théoriques, géotextile A4

Sol 3, C_u = 2.2, d_{50} = 0.5 μm, d_0 = constante = 0.1 μm			
d_{max} (μm)	55	65	75
Passant P (%)	88	88	88
Efficacité E (%)	12	12	12

Tableau 3.9 Influence du diamètre minimum du sol en suspension sur les efficacités théoriques, géotextile A4

C_u = 2.7, d_{max} = constante = 75 μm			
d_0 (μm)	3	1	0.5
Passant P (%)	78	86	89
Efficacité E (%)	22	14	11

marquée sur P (tab. 3.9). Plus d_0 est grand, plus P est petit; autrement dit, plus l'efficacité est élevée. Le pourcentage de passant passe de 89 % (efficacité E = 11 %) pour d_0 = 0.5 μm à P = 78 % (E = 22 %) à d_0 = 3 μm. La filtration d'un sol en suspension, par le géotextile A4, ayant un d_0 6 fois plus grand (0.5 à 3 μm) donne une efficacité 2 fois plus grande. Ceci est dû au fait que les particules fines ont une probabilité de passage plus grande et on les retrouve en plus grand nombre après le processus de la filtration.

3.4.2.5 Granulométrie du sol passant

En utilisant les modèles probabilistes de passage des particules à travers les géotextiles, nous avons établi dans les paragraphes précédents, que le pourcentage de passant et par conséquent, l'efficacité de filtration des géotextiles non tissés aiguilletés dépendent des éléments de structure du filtre et du sol à filtrer. À partir de ces résultats et dans les mêmes conditions supposées précédemment, nous allons essayer de déterminer la granulométrie du sol obtenue après filtration. Si cette granulométrie est notée Gr(d), elle exprime une distribution granulométrique telle que Gr % de particules ont un diamètre inférieur à d.

Soit f(T, x) la fraction de sol de diamètre égal ou inférieur à x, passant à travers le filtre après un temps t = T:

$$f(T,x) = \frac{\mu_s(T,x)}{\mu_s(T)} \qquad (3.46)$$

Elle exprime le rapport de la masse de passant de diamètre égal ou inférieur à x, à l'instant T, sur la masse totale de passant (tous diamètres confondus) à l'instant T:

$$\mu_s(T,x) = M_o \cdot \int_{d_o}^{x} P_g(x) \cdot y(x) \cdot dx \qquad (3.47)$$

et:

$$\mu_s(T) = M_o \cdot \int_{d_o}^{d_{max}} P_g(x) \cdot y(x) \cdot dx \qquad (3.48)$$

Selon l'équation 3.44 donnant le paramètre P, f(T, x) devient:

$$f(T,x) = f(x) = \frac{1}{P} \cdot \int_{d_o}^{x} P_g(x) \cdot y(x) \cdot dx \qquad (3.49)$$

avec:

$$y(x) = \frac{dGr_o(x)}{dx} = \frac{a}{x}$$

où $Gr_o(x)$ est la granulométrie du sol initial à filtrer (équation 3.38).

En terme de tamisage granulométrique, la fraction f(x) représente la fraction de sol de diamètre x. Si on représente la fonction $P_g(x).y(x).1/P$ avec x variant de d_o à d_{max} (fig. 3.22), l'aire A_{do} comprise entre $x = d_o$ et $x = d_o + \Delta x$ est la fraction de sol sur le tamis de diamètre d_o. Cette quantité n'est autre que la fraction de sol qui passe à travers le tamis de diamètre immédiatement supérieur $d_o + \Delta x$, c'est-à-dire $Gr(d_o + \Delta x)$. Donc, l'aire comprise entre d_o et $d_o + \beta\Delta x$, avec ß variant de 0 à $d_{max}/\Delta x$, est la fraction de sol qui passe à travers le tamis de diamètre $d_o + \beta\Delta x$. Elle est aussi la somme des fractions retenues sur chaque tamis de diamètre inférieur à $d_o + \beta\Delta x$ (fig. 3.23):

$$Gr(d) = \sum_{\beta=0}^{\frac{(d-d_o)}{\Delta x}} g(d_o+\beta\Delta x) \cdot \Delta x \qquad (3.50)$$

où:

$$g(x) = \frac{1}{P} \cdot P_g(x) \cdot y(x) \qquad (3.51)$$

Exemple: Avec le géotextile A1, P = 72 % (tab. 3.5), on calcule le pourcentage de particules inférieures à 1.1 μm avec $\Delta x = 0.2$ μm et $d_o = 0.1$ μm:

Gr(1.1) est la somme des fractions de sol retenues sur tous les tamis compris entre d_o = 0.1 μm et d = 0.9 μm:

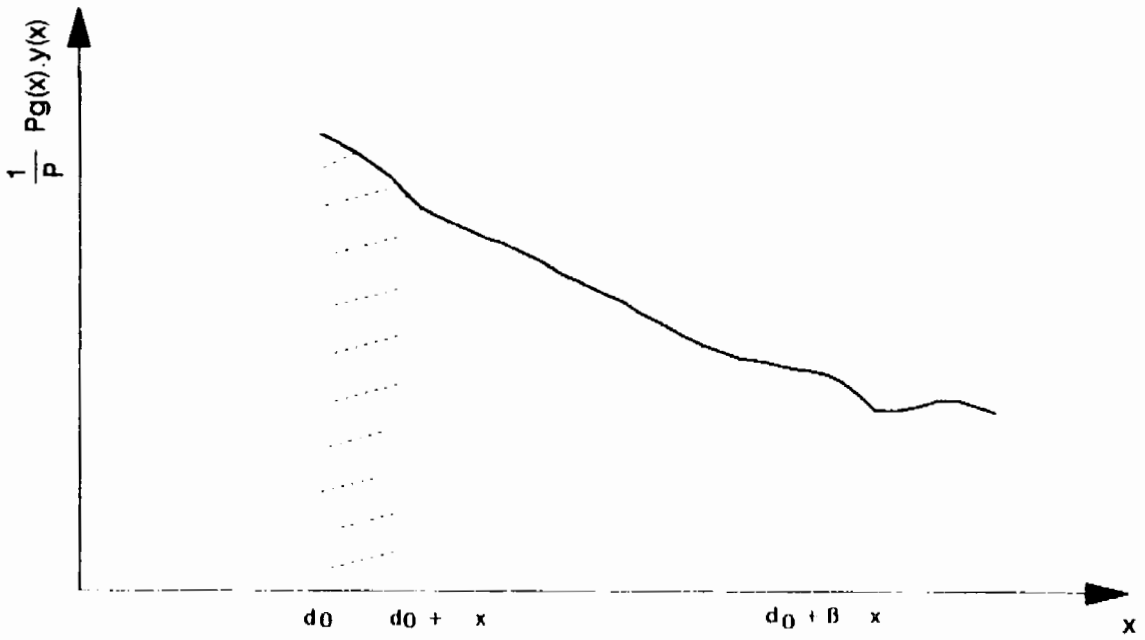


Figure 3.22 Principe de calcul de la granulométrie des passants

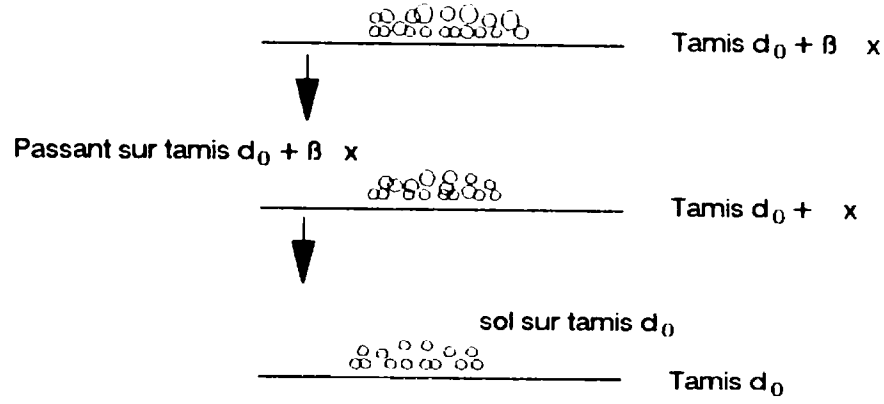


Figure 3.23 Principe de tamisage des particules de sol

$$Gr(1.1) = \sum_{\beta=0}^{5} g(0.1+\beta 0.2)0.2$$

$$Gr(1.1) = [g(0.1)+g(0.3)+g(0.5)+g(0.7)+g(0.9)]0.2$$

$$Gr(1.1) = 0.18 = 18\%$$

À noter que, comme Δx est petit devant d_{max} = 75 μm, nous avons calculé les aires pour chaque diamètre comme des rectangles de surface $g(x).\Delta x$.

Avec Δx = 0.2 μm, ß = 375 (rapport de d_{max} = 75 μm sur Δx = 0.2 μm), les résultats de Gr(d) théorique sont présentés dans les figures 3.24 et 3.25. Pour les géotextiles A (fig. 3.24), plus l'ouverture théorique C_{95} est grande, plus le diamètre des passants est important. Le diamètre moyen d_{50} passe de 41 μm, avant filtration, à 30 μm, après filtration, pour A1 (C_{95} = 177 μm) et de 41 à 10 μm pour A4 (C_{95} = 79 μm). Les géotextiles A1 (fig. 3.24) et B1 (fig. 3.25), ayant des ouvertures théoriques de 177 et 156 μm donnent des distributions granulométriques presque semblables avec des d_{50} respectifs de 30 et 30.5 μm. Ainsi, l'influence de l'ouverture théorique obtenue par le modèle de Q(d) sur les granulométries des passants est très marquée. Ce modèle de simulation de Gr(d) sera discuté et analysé dans le chapitre 5, en fonction des résultats expérimentaux obtenus sur les granulométries.

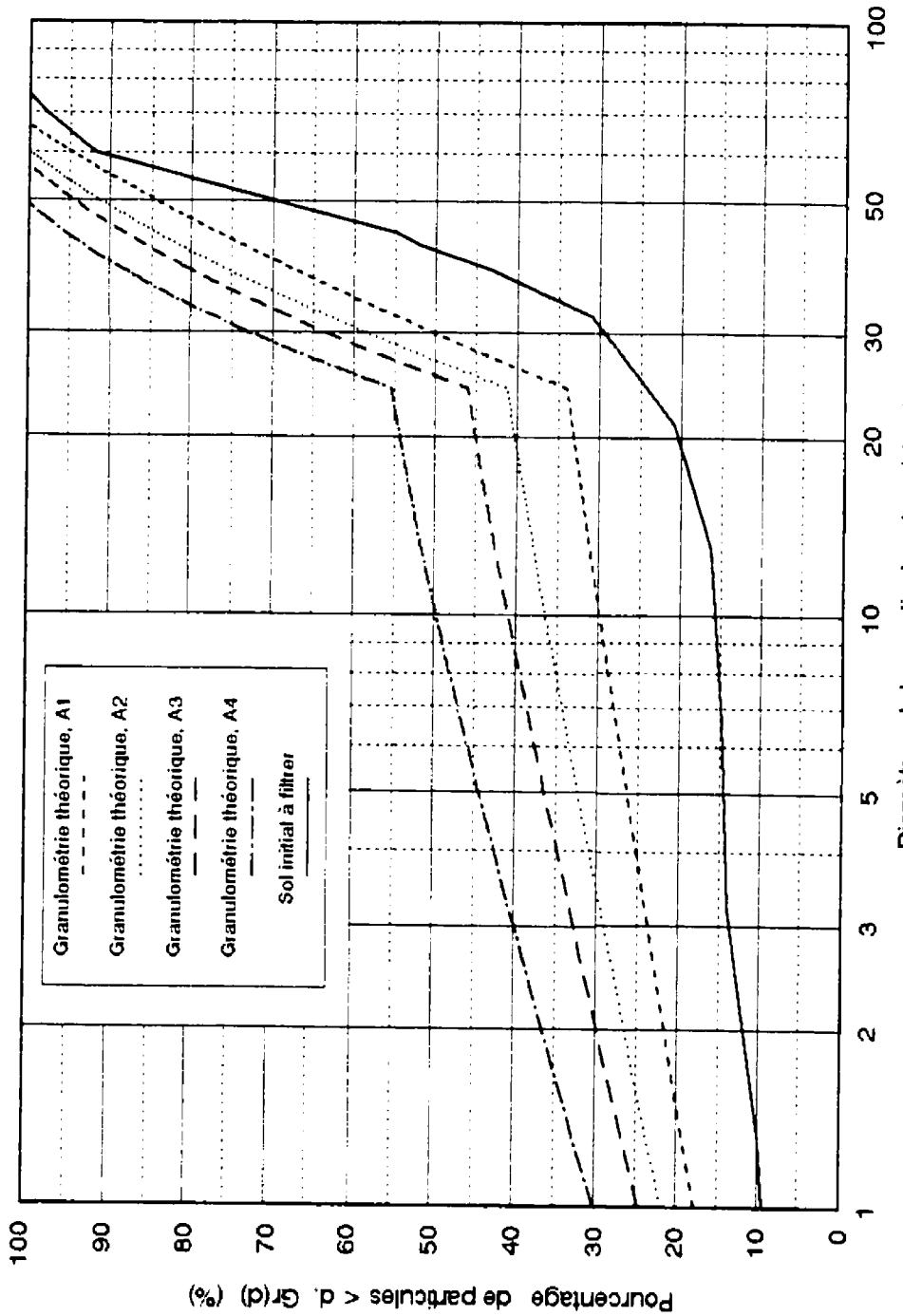


Figure 3.24 Granulométries des sols filtrés obtenues par les modèles théoriques, géotextiles A

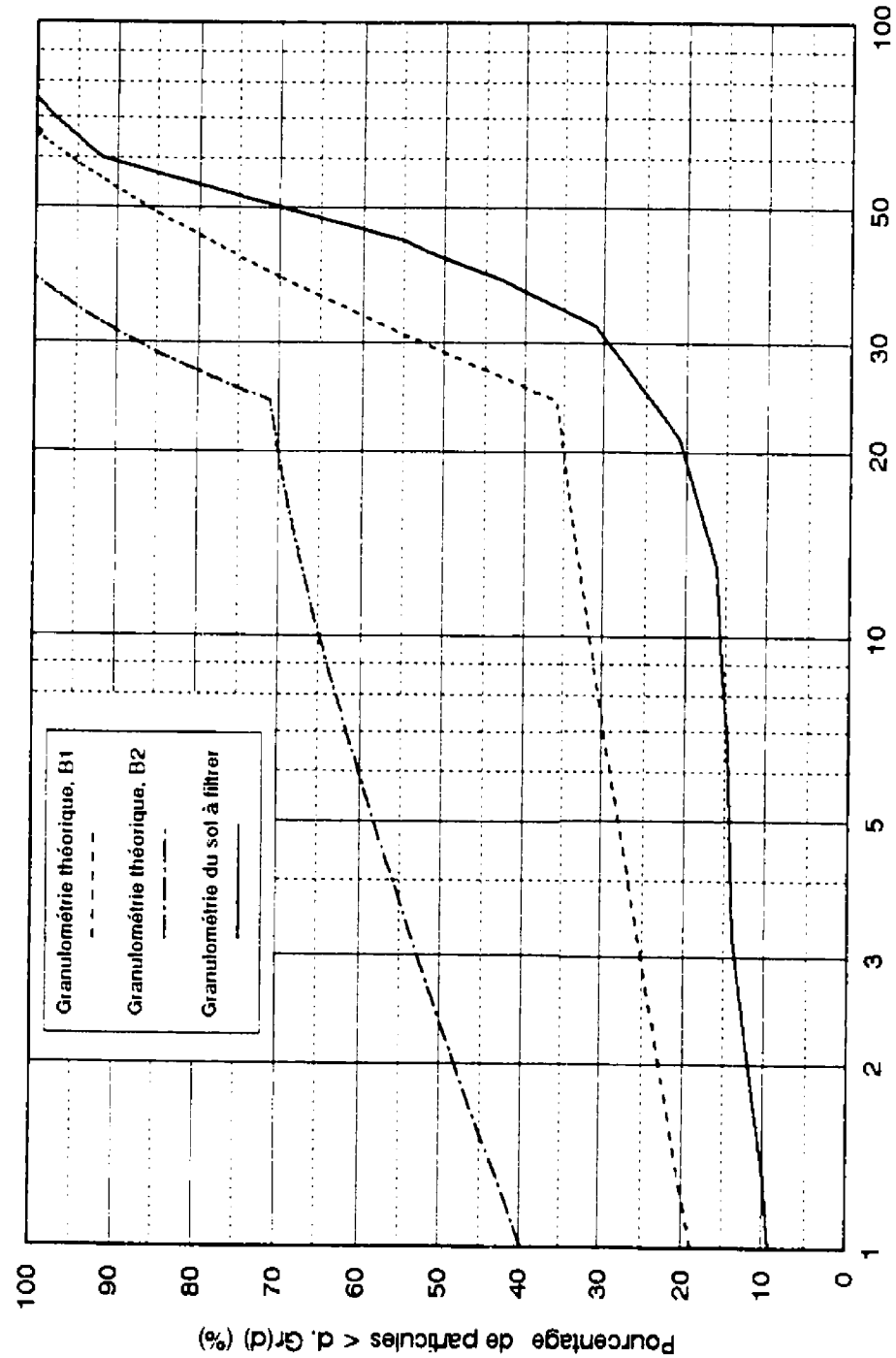


Figure 3.25 Granulométries des sols filtrés obtenues par les modèles théoriques, géotextiles B

3.4.2.6 Évaluation du colmatage théorique des géotextiles étudiés

Le programme de la simulation permet de déterminer le pourcentage de particules retenues dans chaque nappe élémentaire (pourcentage absolu) et les résultats obtenus permettent de représenter pour chaque géotextile, un modèle de rétention du sol en suspension. La figure 3.26 montre la répartition des particules en terme de pourcentage de retenu dans chaque nappe et on remarque que les premières nappes retiennent les plus grandes fractions de sol. À partir de la figure 3.21, on a tiré les pourcentages des particules retenues dans les nappes 1 (à la surface des géotextiles) ainsi qu'à l'intérieur des filtres (somme des retenues dans toutes les autres nappes). Ces pourcentages sont égaux respectivement à R_1 et R_2. Le tableau 3.10 montre les valeurs de R_1 et de R_2 et dans la dernière ligne de ce tableau, on présente les pourcentages de rétention en surface par rapport au total des retenues (avant dernière ligne). On remarque que plus le géotextile est fermé (ouverture théorique C_{90} décroissante de A1 à A4 et de B1 à B2), plus la rétention des particules à la surface diminue; autrement dit, plus la rétention à l'intérieur des filtres est importante. Donc, moins le filtre est ouvert et plus il se colmate.

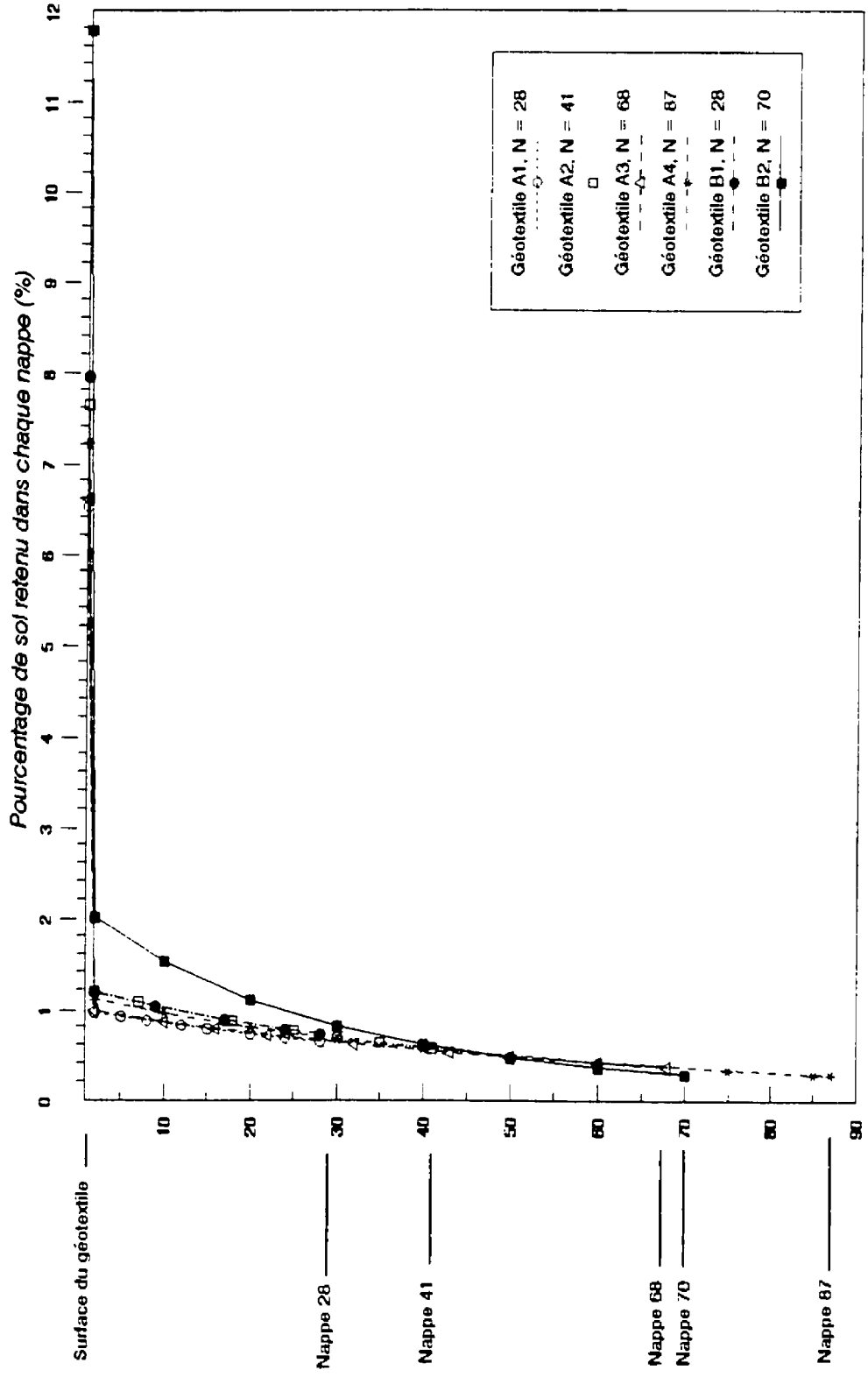


Figure 3.26 Modèle de rétention du sol en suspension par les géotextiles A et B

Tableau 3.10 Répartition du pourcentage de rétention de sol dans les nappes des géotextiles étudiés

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
R_1, nappes 1 (%)	6.5	7.6	6.6	7.2	8	11.8
R_1, autres nappes (%)	21.6	34	41.5	51	25	58
Rétention dans filtre (%)	28.1	41.6	48.1	58.2	33	69.8
% Rétention nappes 1	23	18	14	12.4	24	17

Les résultats théoriques obtenus concernant le modèle de rétention des particules dans la structure (surface et intérieur) des géotextiles permettent d'évaluer le degré de colmatage interne des filtres. En effet, connaissant la section offerte à l'écoulement ou à la rétention des particules de sol, le degré de colmatage est par définition, la diminution relative de la porosité du filtre après filtration:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n - n_f}{n} \qquad (3.52)$$

où n_f est la porosité finale du géotextile.

On rappelle que tous les modèles établis ci-dessus sont basés sur l'hypothèse de

l'indépendance des nappes; autrement dit le sol est retenu au niveau de la surface de chaque nappe. À la fin de chaque essai de filtration, le sol retenu à l'intérieur du géotextile occupe un volume V_{Ri}. Si le volume des vides initial du géotextile vierge est V_v, il est lié au volume total V_t du filtre par:

$$V_v = n.V_g \tag{3.53}$$

et le nouveau volume des vides V'_v après filtration devient:

$$V'_v = V_v - V_{Ri} = n.V_g - V_{Ri} \tag{3.54}$$

Par définition, la nouvelle porosité (finale) n_f est égale à:

$$n_f = \frac{V'_v}{V_g} = n - \frac{V_{Ri}}{V_g} \tag{3.55}$$

et, tous calculs faits, l'équation 3.52 donne le degré de colmatage interne égal à:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{V_{Ri}}{n.V_g} \tag{3.56}$$

Nous remarquons que le degré de colmatage interne dépend de la quantité de sol filtrée (V_{Ri}), c'est-à-dire de la concentration initiale C_0 de la suspension ainsi que du volume V_g du géotextile offert à l'écoulement. Si le volume du sol retenu V_{Ri} remplit tout le volume des vides V_v égal à $n.V_g$, c'est-à-dire $V_{Ri} = n.V_g$, on est en présence d'un colmatage total et le degré de celui-ci est égal à 100 %. Ainsi donc, le modèle de rétention établi ci-dessus permet la prédiction du degré de colmatage interne d'un géotextile en filtration de suspension. Ce degré diminue avec la réduction de la quantité de sol à filtrer (faible concentration initiale en particules solides) ou avec l'augmentation de la section offerte à l'écoulement (V_g croissant). Ce colmatage interne diffère de celui de surface qui est engendré par la formation d'un gâteau de sol formé à la surface du géotextile et dont la quantité en terme de pourcentage est donnée par le paramètre de rétention de surface R_i établi ci-dessus.

Le volume de sol retenu V_{Ri} est le rapport de la masse de sol retenu M_{Ri} à la fin de l'essai de filtration sur la masse volumique des grains de sol ρ_s (= 2.63 g/cm^3). Cette masse M_{Ri} est le produit de la masse de sol totale filtrée M_0 par le pourcentage de rétention R_i établi ci-dessus (tab. 3.10):

$$V_{Ri} = \frac{M_{Ri}}{\rho_s} = \frac{M_0 . R_i}{\rho_s} \qquad (3.57)$$

À titre d'exemple, nous avons calculé les degrés de colmatage interne théoriques des

géotextiles A et B en filtration de suspension à différentes concentrations initiales C_o. Le tableau 3.11 montre les résultats théoriques obtenus en considérant des essais qui durent t = 132 min à un débit d'écoulement Q1 = 35 cm³/s (il s'agit des essais prévus et réalisés dans le programme expérimental décrit en détail dans le chapitre 4). Dans ce cas, la masse totale filtrée M_0 est:

$$M_0 = Q1 . t . C_0 \qquad (3.58)$$

Tableau 3.11 Degrés de colmatage interne théoriques (en %) des géotextiles étudiés pour différentes C_0

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Ri	0.21	0.34	0.415	0.51	0.25	0.58
C_0 = 0.5 g/l	**29.5**	**33**	**24**	**23**	**33**	**32**
C_0 = 1 g/l	**59**	**66**	**47**	**46**	**66**	**63**
C_0 = 2.5 g/l	**147**	**165**	**118**	**114**	**165**	**158**
C_0 = 5 g/l	**295**	**329**	**237**	**228**	**330**	**316**
C_0 = 10 g/l	**589**	**659**	**473**	**456**	**660**	**632**
C_0 = 20 g/l	**1178**	**1317**	**947**	**912**	**1320**	**1264**

Pour les besoins de l'analyse, nous avons considéré une section offerte à l'écoulement égale à 310 cm². Cette section correspond à la section initiale du géotextile (230 cm²)

calculée sur une hauteur de 11.5 cm (cf. chapitre 4) et une largeur de 20 cm à laquelle nous avons ajouté une section due à la perte de charge avec une moyenne de 4 cm ($4 \times 20 = 80$ cm^2).

Ce qui est intéressant de remarquer dans le tableau 3.11 ce sont les valeurs très élevées de $\Delta n/n$ pour des $C_0 > 2.5$ g/l. Elles sont toutes supérieures à 100 %, ce qui montre un colmatage total des géotextiles A et B. Le modèle de rétention donne bien sûr des quantités de sol retenues très élevées par rapport au volume des vides disponible dans le géotextile ($V_{R_i} >> n.V_g$). Par exemple à 20 g/l, le géotextile A1 est appelé théoriquement à arrêter à l'intérieur des fibres un volume de sol 12 fois supérieur à son volume des vides disponible qui est égale à $n.V_g$, ce qui est évidemment impossible. C'est la raison pour laquelle la théorie développée ci-dessus n'est valable que pour des suspensions à faibles concentrations initiales en particules solides C_0 et surtout que les modèles établis ne tiennent pas compte du phénomène d'autofiltration susceptible de se produire selon les valeurs de C_0 et qui ferait diminuer le degré de colmatage interne $\Delta n/n$.

Les plus faibles degrés de colmatage interne sont observés pour les essais à $C_0 = 0.5$ g/l, ils varient de 23 à 33 % et ceci quelque soit le géotexile. Cependant, les plus faibles valeurs de $\Delta n/n$ sont associées aux géotextiles ayant les plus fortes épaisseurs T_g (4.1 et 3.2 mm pour A4 et A3, et 3.5 mm pour B2). Ceci est évident étant donné que le colmatage dépend du volume du géotextile offert à la filtration et comme nous avons

considéré une section constante (= 310 cm^2), alors l'influence se fait en terme d'épaisseur T_g. Le tableau 3.11 montre que les degrés de colmatage interne du géotextile B2 sont particulièrement comparables à ceux des autres géotextiles malgré le fait qu'il présente le pourcentage de rétention interne des particules de sol le plus élevé (R_i = 58 %, tab. 3.10) et l'ouverture théorique la plus faible (C_{95} = 60 μm); ceci est dû à son épaisseur plus élevée (T_g = 3.5 mm) offrant un volume de filtration plus important et ayant une influence plus importante que celle de la quantité de sol filtrée. Cependant, il faut rappeler que ce géotextile B2 donne le pourcentage de rétention théorique de surface le plus élevé (R_s = 12 %, tab. 3.10) et nous verrons dans l'analyse des résultats expérimentaux (chapitre 5) que ce filtre se colmate beaucoup plus rapidement suite justement à ce colmatage de surface relativement très important.

À partir de ces résultats théoriques, on peut dire que la théorie développée qui est basée uniquement sur les probabilités de passage des particules à travers une structure fibreuse c'est-à-dire sur le passage d'une granulométrie de sol en suspension à travers une distribution de pores, permet la prédiction du degré de colmatage des géotextiles. Cette prédiction est d'autant plus valable que le mécanisme de rétention des particules n'est assuré que par la structure du filtre géotextile et justifiant l'hypothèse que la théorie probabiliste développée ci-dessus ne tient pas compte d'un processus de rétention éventuel par autofiltration. Ce dernier dépendrait probablement, entre autres, de la concentration initiale en particules solides C_o comme on le verra lors de l'analyse des résultats expérimentaux (chapitre 5).

3.5 Conclusion

Pour quatre géotextiles non tissés de type A et deux de type B, les ouvertures de filtration FOS déterminées à partir des essais de tamisage hyrodynamique recommandés au Canada selon les normes CAN/CGSB-148.1-10 ont permis de vérifier la validité du modèle théorique de structure obtenu par la théorie des polyèdres poissoniens. Ainsi, la détermination de l'ouverture de filtration des non tissés aiguilletés étudiés permet aussi d'observer l'influence de leurs paramètres structuraux comme la porosité n et l'épaisseur T_t.

Le choix d'une épaisseur de nappe égale à $2d_f$ introduite dans le modèle de structure de Faure (1988) donne les valeurs de l'ouverture théorique C_{95} très compatibles avec les ouvertures mesurées au tamisage hydrodynamique.

L'utilisation de ce modèle de structure dans la filtration des suspensions de sol de granulométrie donnée a permis d'établir une simulation afin de prédire les capacités en terme d'efficacité de filtration par les géotextiles non tissés aiguilletés. Dans les conditions énoncées ci-dessus, cette simulation donne le pourcentage de passants cumulés des particules de sol après filtration ainsi que la granulométrie du sol obtenue à l'aval.

Les résultats théoriques obtenus montrent que le modèle de simulation de ces deux paramètres est indépendant d'une part, de la concentration initiale en particules solides

en suspension (pour de faibles concentrations) et d'autre part, du débit ou de la vitesse d'écoulement.

Le modèle de distribution de rétention des particules dans les géotextiles après filtration permet l'évaluation théorique du degré de colmatage des filtres. Il montre que le colmatage dépend de la concentration initiale C_0 en particules solides des suspensions filtrées. L'analyse des résultats théoriques du colmatage a permis de justifier les conditions d'établissement des modèles théoriques et de fixer selon le volume du géotextile offert à l'écoulement, une limite de C_0 au-dessous de laquelle ces modèles sont valides.

Les résultats théoriques obtenus confirment enfin que le processus de la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés aiguilletés dépend de deux paramètres: la capacité de rétention, ou efficacité de filtration E, indépendante de C_0 et le degré de colmatage qui dépend de la concentration initiale en particules solides.

Afin de confirmer ou d'infirmer ces résultats, nous allons confronter ces résultats théoriques à ceux obtenus à partir d'un programme expérimental d'essais de filtration de suspensions par les géotextiles non tissés aiguilletés retenus.

CHAPITRE 4

APPAREILLAGE ET EXPÉRIMENTATION DE L'ESSAI DE FILTRATION DE SUSPENSIONS

4.1 Introduction

Afin de pouvoir évaluer la qualité des résultats théoriques ou de vérifier les modèles de prédiction établis au chapitre 3, un programme expérimental approprié a été réalisé. Une première partie expérimentale présentée dans le chapitre précédent, a permis de déterminer les caractéristiques physiques liées aux géotextiles étudiés et au sol en suspension utilisé qui décrivent les modèles de l'efficacité de filtration, de la granulométrie du sol de la suspension filtrée et du modèle de prédiction du degré de colmatage. Nous présentons dans ce chapitre la description et les procédures expérimentales de l'essai de filtration de suspensions. L'analyse des résultats obtenus dans cette deuxième partie expérimentale est présentée dans le chapitre 5.

4.2 Principe général

Le principe général de notre programme expérimental repose sur la détermination des 3 paramètres suivants:

- l'efficacité de filtration mesurée (E_{mes}) des 6 géotextiles étudiés (A1, A2, A3, A4, B1

et B2), elle est obtenue à partir de la mesure du pourcentage de passants à la fin des essais de filtration,

- la granulométrie du sol en suspension obtenue après filtration,
- le degré de colmatage des géotextiles étudiés.

Parmi les résultats théoriques fondamentaux obtenus à partir de l'analyse des modèles de prédiction de ces paramètres, nous avons vu que l'efficacité de filtration E d'un géotextile non tissé dépend uniquement des caractéristiques physiques du filtre et de la granulométrie du sol en suspension. Cette efficacité qui caractérise la capacité de rétention des géotextiles étudiés est indépendante théoriquement de la concentration initiale C_0 en particules solides et du débit d'écoulement (ou vitesse d'écoulement). En ce qui concerne le degré de colmatage établi en terme de variation "physique" relative de la porosité ($\Delta n/n$), nous avons vu qu'il dépend de la quantité de sol filtrée c'est-à-dire de la concentration en particules solides des suspensions.

Nous avons donc réalisé des essais de filtration sur géotextiles non tissés à différentes concentrations initiales C_0 et à différents débits d'écoulement Q. Le critère de choix des filtres et les caractéristiques des 6 géotextiles étudiés sont déjà présentés dans le chapitre 3 (§ 3.3). Un seul sol a été utilisé dans les suspensions et ses caractéristiques sont présentées ci-dessus dans le paragraphe 3.4.2.2.

L'influence de l'ouverture de filtration FOS et de la concentration initiale C_0 sur le

comportement en filtration de suspensions sera analysée à partir de 6 séries d'essais. Chaque série correspond à une concentration C_0 = 0.5, 1, 2.5, 5, 10 et 20 g/l, ce qui donne 36 essais de filtration réalisés dans les mêmes conditions expérimentales particulièrement à un débit d'écoulement constant Q1 = 35 cm^3/s. Deux autres séries d'essais à différentes C_0 et à des débits constants Q2 et Q3 égaux respectivement à 70 et 105 cm^3/s sont réalisés sur le géotextile A3; elles permettent d'étudier l'influence du débit d'écoulement sur les paramètres mesurés.

4.3 Appareillage de l'essai de filtration de suspensions

L'appareil utilisé pour les essais de filtration est présenté aux figures 4.1 et 4.2. C'est cet appareil qui a permis à Mlynarek (1989) de simuler les conditions de filtration de suspensions des eaux chargées de sédiments d'une municipalité du Québec. Certains changements y ont été apportés afin de surmonter les difficultés rencontrées. Il s'agit d'une réduction du volume du compartiment amont et de l'installation d'équipements de mixage des suspensions. Ces équipements permettent surtout un meilleur mélange ou une meilleure homogénéisation des suspensions à filtrer durant les essais. La modification apportée à la géométrie du canal amont concerne l'installation d'une plaque inclinée de 41° par rapport à l'horizontale; elle permet d'éliminer, sinon de réduire au maximum, la sédimentation des particules. Enfin, le changement de conduite d'alimentation du canal (à la sortie du réservoir intermédiaire) de plus gros diamètre permet de réaliser des écoulements à des débits plus élevés que celui imposé initialement par Mlynarek (1989).

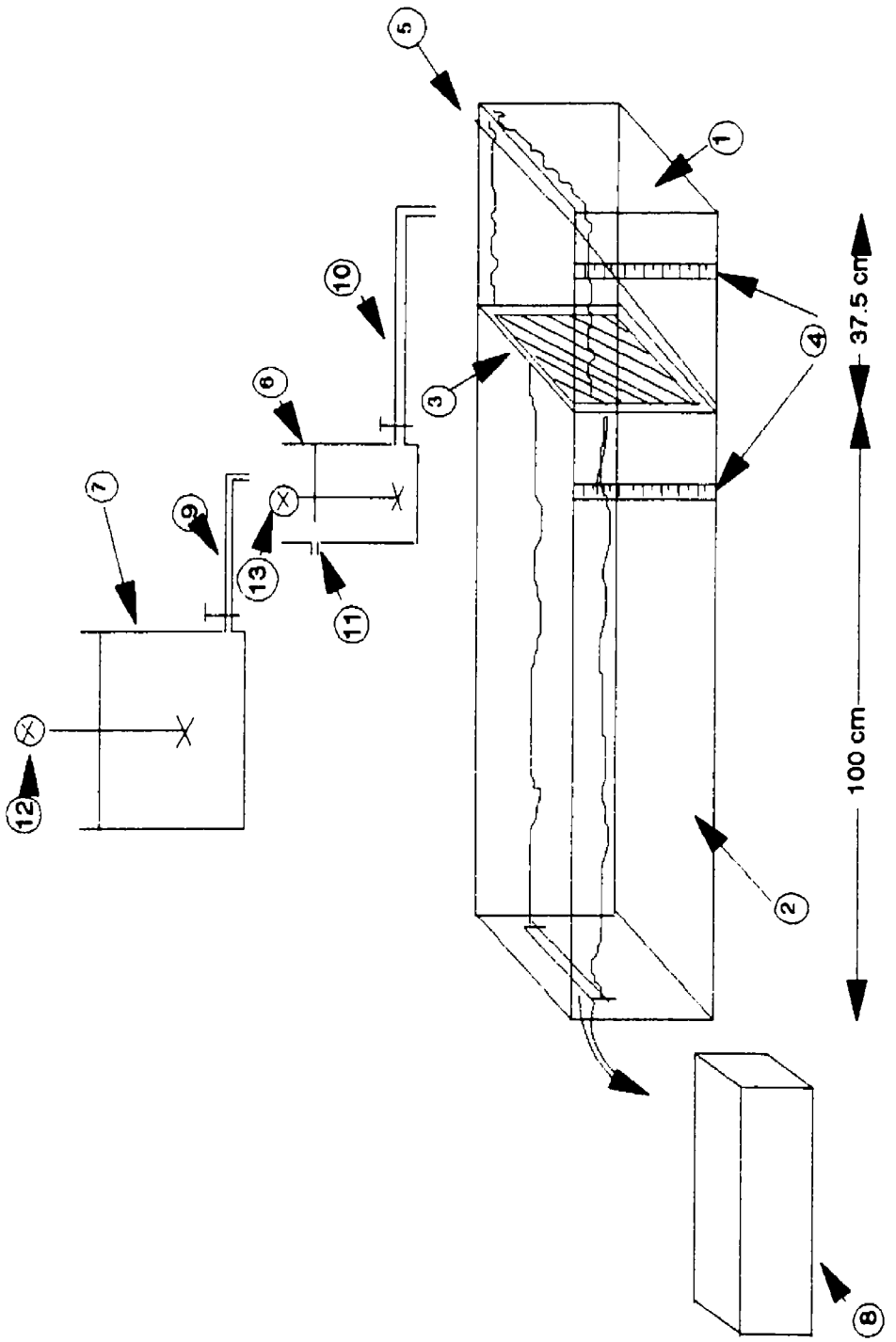


Figure 4.1 Schéma de l'essai de filtration de suspensions

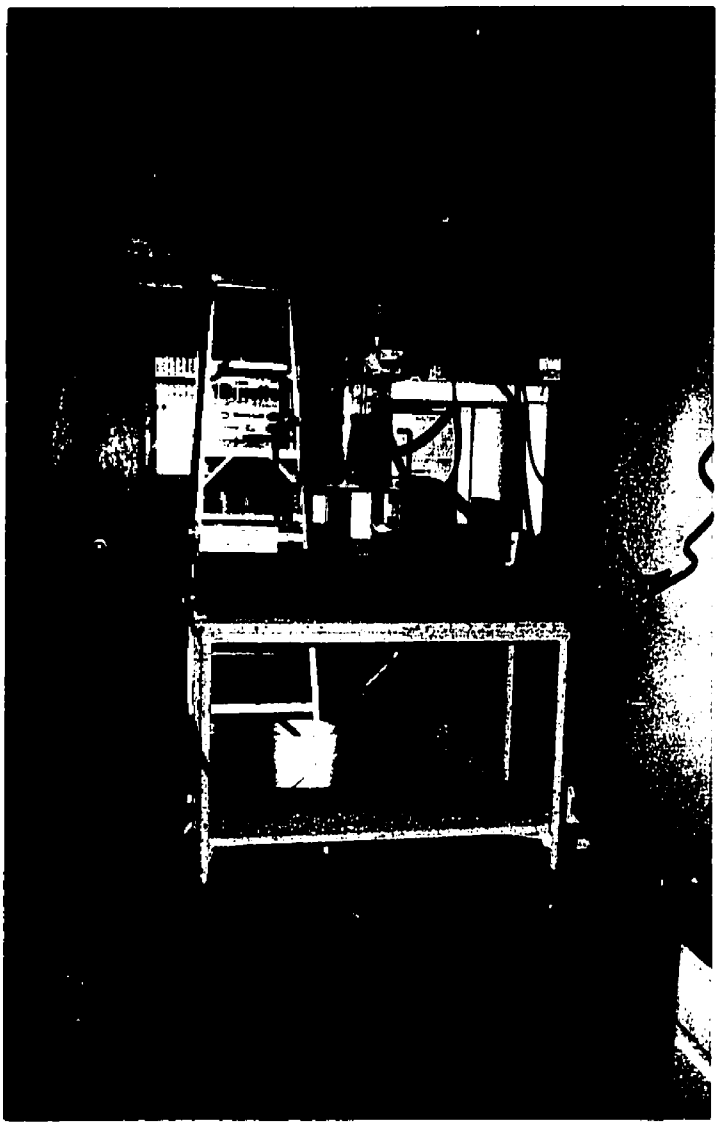


Figure 4.2 Appareillage de l'essai de filtration de suspensions

L'appareillage consiste en un canal horizontal en plexiglas constitué de deux compartiments (fig. 4.1). Le compartiment amont (1) a une section transversale de 400 cm^2 (20 * 19.5), d'une longueur de 37.5 cm et est équipé d'une plaque (5) en plexiglas inclinée de 41° par rapport à l'horizontale. Cette inclinaison permet d'éliminer ou de réduire au maximum la sédimentation des particules avant d'atteindre le géotextile. Deux règles graduées (4) permettent de relever les charges à l'amont et à l'aval du filtre géotextile testé (3) qui est placé verticalement entre 1 et 2. Le compartiment aval, de même section transversale et de longueur égale à 1.00 m, est équipé d'un déversoir en plexiglas situé à 11.5 cm de la base du canal et permet de récupérer le produit de la suspension filtrée. Un réservoir intermédiaire (6) ayant un volume de 22 litres alimente le compartiment amont à l'aide d'un tuyau flexible (10). Ce réservoir est alimenté lui-même par un grand réservoir (7) de 580 litres à l'aide d'un flexible (9). Le trop plein (11) permet de maintenir la charge constante dans le réservoir intermédiaire et d'avoir un débit d'alimentation constant. Les deux réservoirs 6 et 7 sont équipés respectivement des mélangeurs 13 et 12 qui ont les caractéristiques suivantes:

- mélangeur (12) provenant de la compagnie Cheminner Inc., modèle PGA-2V et de vitesse de rotation variant entre un minimum de 125 et un maximum de 500 tours/minute,
- mélangeur (13) provenant de la compagnie American Instrument et de vitesse de rotation égale à 1750 tours/minute.

Enfin, la suspension filtrée est récupérée dans un réservoir (8) placé à l'aval du

compartiment 2 où les mesures de débits sont effectués.

4.4 Procédures expérimentales

La simulation de l'essai de filtration établie dans le chapitre 3 a permis d'évaluer l'efficacité de filtration à partir de l'évolution du pourcentage de passant cumulé des particules solides en fonction du temps. Dans notre programme expérimental, ce pourcentage de passant est obtenu, entre autres mesures, à partir de la variation de la concentration C_d mesurée à l'aval du géotextile en fonction du temps t. Les courbes $C_d = f(t)$ obtenues à la fin de chaque essai permettent de présenter les variations des passants en fonction du temps. Avant de présenter le principe de passage d'un résultat à l'autre et le principe de mesure des différents paramètres, nous décrivons ci-dessous le déroulement de l'essai de filtration tel que réalisé au laboratoire.

4.4.1 Description de l'essai de filtration

Durant un essai de filtration, 3 paramètres sont mesurés: le débit d'écoulement à la sortie du géotextile, la perte de charge entre l'amont et l'aval du filtre et la concentration C_d de la suspension filtrée et obtenue à l'aval du géotextile.

Les suspensions à filtrer sont préparées dans le réservoir (7) (fig.4.1) où, au volume de l'eau retenu, est ajoutée la quantité nécessaire de sol préalablement tamisée au tamis 200

(75 μm) et correspondant à la concentration initiale C_0 désirée. La masse de sol M, à mettre dans le volume V_w est donnée par:

$$M_S = C_0 \cdot V_w \tag{4.1}$$

Avant de préparer la suspension à filtrer, on mesure la masse volumique ρ_w de l'eau car ce facteur sert à la détermination de la concentration. L'eau utilisée a une température qui varie généralement entre 18 et 20° C, ce qui donne des masses volumiques ρ_w variant entre 0.994 et 0.999 g/cm^3. Ces dernières sont mesurées par le rapport de la masse de l'eau d'un échantillon prélevé à l'aide d'une éprouvette graduée, sur le volume de cet échantillon. Le volume mesuré dépend bien sûr du volume d'air contenu dans l'eau mais nous n'avons pas pu utiliser de l'eau désaérée pour deux raisons principales:

1 - à cause du grand volume d'eau utilisé; environ 400 l,

2- à cause de la simulation des conditions réelles de filtration de suspensions.

Au début de l'essai (à t = 0), le canal est vide contrairement aux essais de Mlynarek (1989) qui remplit les deux compartiments avec de l'eau claire jusqu'au niveau du déversoir aval. Il ajoute ensuite la quantité de sol nécessaire dans le volume d'eau du compartiment amont avant de démarrer l'essai. Cette façon de faire ne permet pas d'avoir une concentration homogène à celle préparée dans le réservoir et surtout que le mixage de ce volume de suspension peut perturber les conditions initiales de l'essai.

Dans notre cas, l'essai commence donc dès l'ouverture du robinet d'alimentation du canal amont. Ce qui signifie que l'essai de filtration est composé de deux phases. Une phase transitoire d'écoulement non permanent qui dure entre 10 et 12 min et où les débits à la sortie du filtre géotextile augmentent brusquement pendant les 5 premières minutes, puis lentement jusqu'à ce qu'ils se stabilisent à environ 35 cm^3/s pour les séries d'essais à débit égal à Q1. Comme le déversoir est situé à 11.5 cm de la base du canal, les mesures de débits durant cette phase transitoire sont mesurés à partir du volume de suspension passant à travers le filtre pendant des intervalles de temps égaux à 2 minutes et les valeurs obtenues peuvent être très élevées par rapport au palier de stabilisation de $Q = f(t)$ (§ 4.4.2, fig. 4.3). Ceci est dû à l'écoulement préférentiel dans l'entonnoir formé par la plaque inclinée et le plan vertical du géotextile dans le compartiment amont du canal (fig. 4.1). Durant cette phase, seuls les débits et les pertes de charge sont mesurés étant donné que la mesure de la concentration à l'aval C_d n'est pas possible à cause du fait que celle-ci est faite par prélèvement d'échantillon et que cette opération ne peut pas se faire toutes les 2 min. La deuxième phase commence dès que l'écoulement de la suspension passe à travers le déversoir et où les mesures de débits sont effectuées à partir du volume de suspension recueilli par unité de temps à l'aide d'une éprouvette graduée et de capacité égale à 2 litres. Les débits mesurés durant cette phase montrent qu'ils sont en général constants avec une très légère fluctuation (§ 4.4.2), ce qui montre qu'on est en présence d'un écoulement permanent. Les mesures des pertes de charge et des concentrations du filtrat à l'aval du géotextile sont effectuées à des intervalles de temps réguliers égaux à 5 et 10 min.

Des mesures de concentrations d'alimentation (C_0) à l'amont du géotextile (ou à la sortie du canal intermédiaire, fig. 4.1) sont réalisées à des intervalles de temps de 20 min; elles montrent une très légère variation mais ne dépassant pas 5 %. On peut donc admettre que la concentration initiale C_0 préparée dans le réservoir principal et arrivant au filtre géotextile est constante.

Les essais à débit Q1 égal à 35 cm^3/s durent au maximum 135 min, ce qui permet de faire écouler un volume de suspension d'environ 280 litres. Cette durée des essais n'est pas fixée au préalable; elle dépend du comportement des filtres géotextiles testés en filtration de suspensions et des possibilités de mesures de l'appareillage utilisé. En effet, des essais préliminaires réalisés sur tous les géotextiles étudiés ont montré que les paramètres de la perte de charge et de la concentration C_d obtenues se stabilisent après une durée d'environ 110 à 120 min. La même remarque est observée dans les deux autres séries d'essais à des débits plus élevés Q2 (= 70 cm^3/s) et Q3 (= 105 cm^3/s) où cette stabilisation est observée après des périodes respectives d'environ 80 et 50 min. Les durées de ces deux séries d'essais sont égales respectivement à 98 et 65 min.

À la fin de chaque essai de filtration, le géotextile est récupéré après la vidange des 2 compartiments du canal; il est séché à l'air libre pendant environ 36 heures pour fin d'analyse au microscope. Cette opération permet de réaliser des mesures du degré de colmatage dont la procédure est décrite ci-dessous au paragraphe 4.7.

4.4.2 Débits d'écoulement

À titre de vérification des conditions d'écoulement en terme de vitesse, les débits sont mesurés à des intervalles de temps réguliers. La figure 4.3 montre d'une façon générale, que les essais sont réalisés à débits constant après la période transitoire de 10 à 12 min pour les essais à Q1 = 35 cm^3/s, tandis que cette période transitoire dure 8 et 5 min respectivement pour les essais à Q2 = 70 cm^3/s et Q3 = 105 cm^3/s (fig. 4.4 et 4.5).

Dans tous les essais à débit Q1, les débits varient entre 34 et 35 cm^3/s. L'estimation de la vitesse d'écoulement correspondant à ces débits n'est pas chose facile à réaliser car la section offerte à l'écoulement à l'aval entre la base du canal et le niveau du déversoir situé à 11.5 cm n'est pas connue. Cependant, la considération de la section totale entre la base et le déversoir et qui est égale à environ 225 cm^2 (19.5*11.5) permet d'estimer une vitesse moyenne à travers le géotextile de l'ordre de 0.15 cm/s. Les figures 4.4 et 4.5 montrent les variations des débits en fonction du temps obtenues avec le géotextile A3 à des débits Q2 et Q3 et les débits mesurés sont en moyenne égaux respectivement à 69 et 103 cm^3/s, ce qui correspond à des vitesses moyennes respectives de 0.30 et 0.45 cm/s.

4.4.3 Pertes de charge

Les pertes de charge ΔH sont mesurées par la différence de niveau entre l'amont et

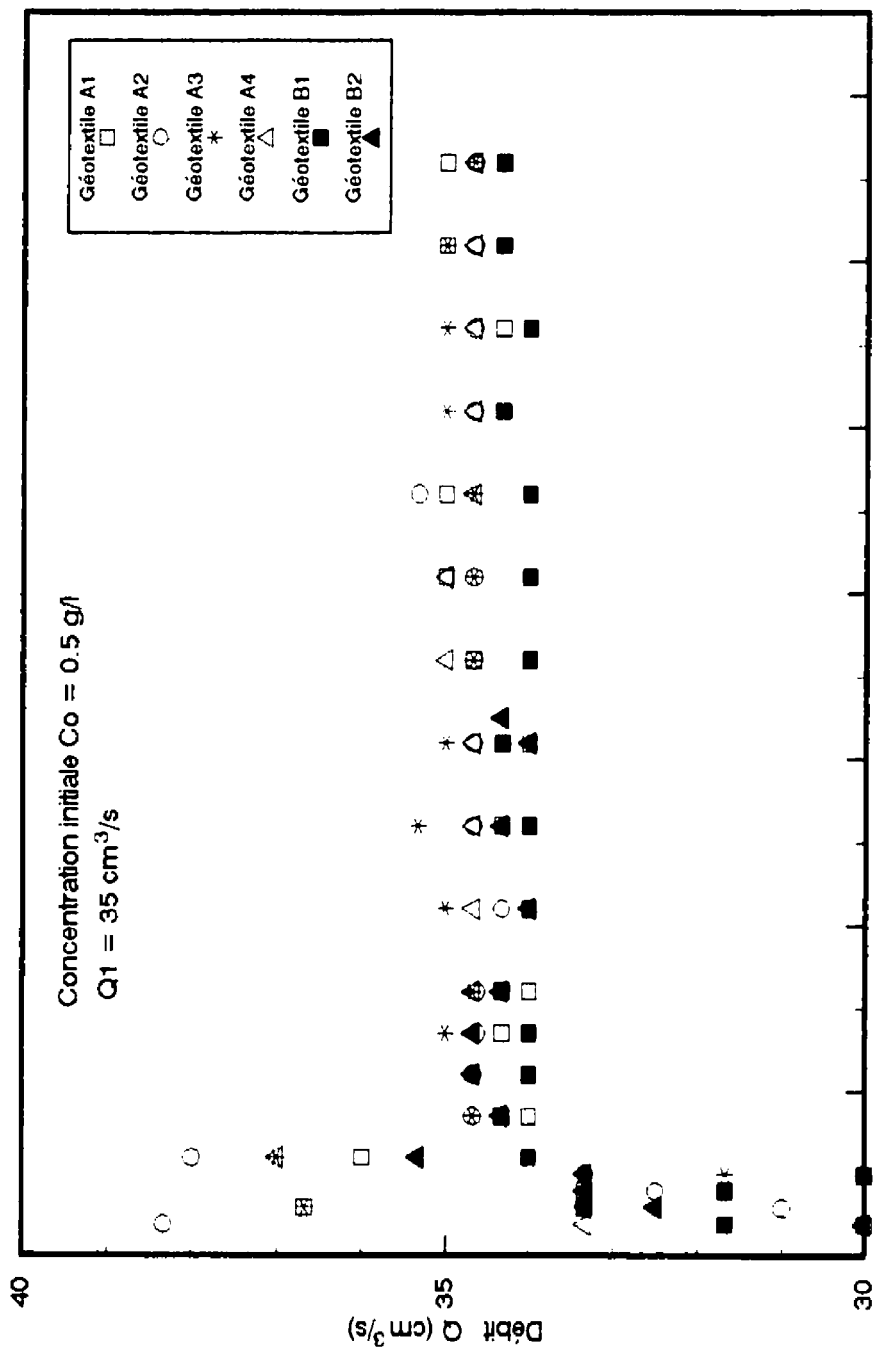


Figure 4.3 Variation des débits en fonction du temps, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

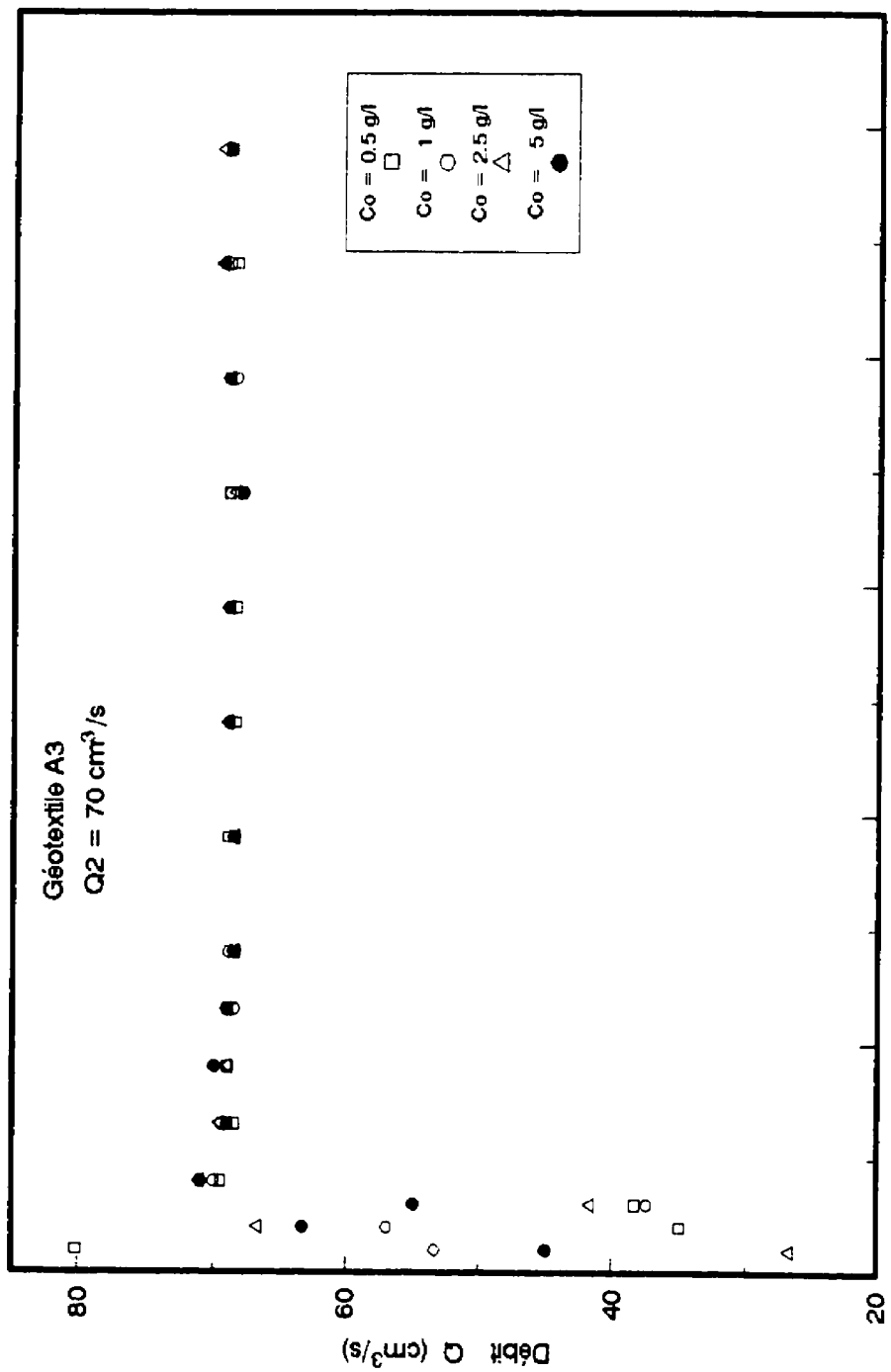


Figure 4.4 Variation des débits en fonction du temps, géotextile A3, Q2 = 70 cm^3/s

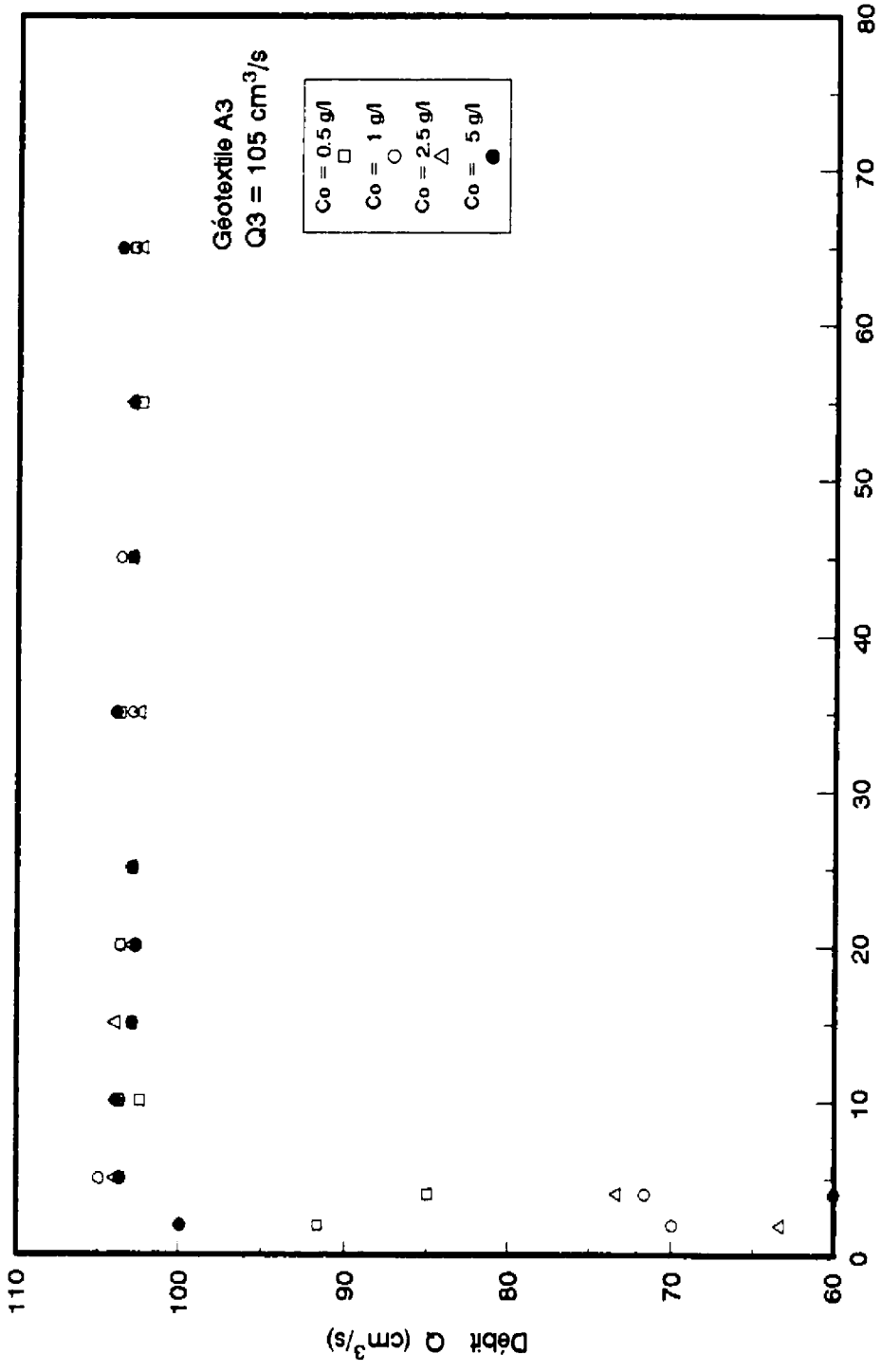


Figure 4.5 Variation des débits en fonction du temps, géotextile A3, Q3 = 105 cm^3/s

l'aval du filtre géotextile. Durant la période transitoire, les mesures de pertes de charge entre l'amont et l'aval du géotextile sont effectuées toutes les 2 min par lecture des niveaux de la suspension de part et d'autre du filtre et avec des erreurs ne dépassant pas 0.25 mm. Après cette période, le niveau aval devient constant (11.5 cm) à cause de l'écoulement à travers le déversoir et les mesures de pertes de charge sont faites toutes les 5 min jusqu'à 32 min d'essai et toutes les 10 minutes jusqu'à la fin de l'essai (tab. 4.1).

4.4.4 Concentrations C_d en particules solides mesurées à l'aval du géotextile

La mesure de la concentration C_d permet de tracer les courbes $C_d = f(t)$ et par suite de déterminer les courbes des pourcentages de passants en fonction du temps ($Pa_{mes} = f(t)$). Étant données les valeurs relativement très élevées des concentrations mesurées (> 0.4 g/l) par rapport aux possibiltés de mesure des appareils électroniques basés sur le comptage des particules d'un flux de sédiments donné, nous avons mesuré C_d à l'aide de prélèvements d'échantillons de suspension par une éprouvette graduée de 1 à 100 cm^3. Cette manière de faire est très délicate car elle suppose la détermination des masses volumiques de la suspension prélevée ρ_m (l'indice m est employé par référence au mélange sol-eau), de celle de l'eau ρ_w mesurée avant le début de l'essai et de celle du sol en suspension ρ_s (= 2.63 g/cm^3). On remarque donc que la mesure de C_d peut comporter des incertitudes plus ou moins importantes et dont nous décrirons les limites ci-dessous.

Tableau 4.1 Mesures obtenues sur un essai de filtration de suspensions

Essai de filtration No 4, Co = 0.5 g/l

Date: 22 Mars 1994 Géotextile: A4 ρ_w = 0.994 g/cm^3 ρ_s = 2.63 g/cm^3

Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H_{am} (cm)	H_{av} (cm)	ΔH (cm)	Mesures des concentrations Cd				
					Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	Cv 10^{-4}	Cd (g/l)
0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
2	25	3.0	1.5	1.5	-	-	-	-	-
4	33.33	4.2	3.5	0.7	-	-	-	-	-
6	33.33	5.9	5.5	0.4	-	-	-	-	-
8	33.33	7.8	7.5	0.3	-	-	-	-	-
10	33.33	9.6	9.4	0.2	-	-	-	-	-
12	37	11.7	11.5	0.2	97.44	98	0.99428	1.71	0.45
17	34.33	12	11.5	0.5	97.19	97.75	0.99427	1.63	0.43
22	34.67	12	11.5	0.5	98.68	99.25	0.99426	1.597	0.42
27	34.67	12	11.5	0.5	93.46	94	0.99425	1.52	0.40
32	34.67	12	11.5	0.5	94.95	95.50	0.99424	1.48	0.39
42	34.67	12	11.5	0.5	98.18	98.75	0.99422	1.37	0.36
52	34.67	12	11.5	0.5	95.44	96	0.99417	1.03	0.27
62	34.67	12	11.5	0.5	91.96	92.50	0.99416	0.95	0.26
72	35	12	11.5	0.5	93.20	93.75	0.99413	0.798	0.21
82	35	12	11.5	0.5	96.43	97	0.99412	0.72	0.19
92	34.67	12.05	11.5	0.55	93.94	94.50	0.99407	0.456	0.12
102	34.67	12.05	11.5	0.55	95.43	96	0.99406	0.36	0.095
112	34.67	12.1	11.5	0.6	91.95	92.50	0.994054	0.342	0.087
122	34.67	12.15	11.5	0.65	96.92	97.50	0.99405	0.274	0.072
132	34.67	12.15	11.5	0.65	95.18	95.75	0.99404	0.27	0.07

La concentration C_d, exprimée en g/l, est donnée par la relation simple de mécanique des sols suivante:

$$C_d = C_v \cdot \rho_s \tag{4.2}$$

où C_v est la concentration volumique de la suspension et ρ_s, mesuré et exprimé en g/l, est égal à 2630 g/l (ou 2630 kg/m^3):

$$C_v = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \tag{4.3}$$

On voit donc que pour mesurer C_d (tab. 4.1) à chaque intervalle de temps, il faut faire la mesure de la masse volumique ρ_m de l'échantillon de suspension prélevé. L'éprouvette avec la suspension est pesée et la masse nette divisée par le volume indiqué dans l'éprouvette donne ρ_m. La prise d'échantillon de suspensions se fait à mi-hauteur du compartiment aval du canal et à environ 3 cm du filtre géotextile. Tous les résultats de mesure obtenus après un essai de filtration sont notés et compilés selon la forme du tableau 4.1 qui présente un exemple d'essai de filtration réalisé avec le géotextile A4 et à une concentration initiale C_0 = 0.5 g/l. Les masses nettes et les volumes indiqués dans ce tableau correspondent respectivement aux masses (masse brute moins tare de l'éprouvette) et aux volumes des suspensions prélevées. Les résultats de mesures obtenus dans tous les essais sont présentés en annexe II.

4.4.5 Calcul d'erreurs

L'éprouvette utilisée dans la mesure des concentrations ainsi qu'à la mesure de la masse volumique de l'eau ρ_w est graduée de 1 à 100 cm^3 et les erreurs de lectures, entre autres, ont une très grande influence sur les concentrations mesurées. En effet, si l'erreur sur la mesure de la masse est $\Delta M = \pm 0.01$ g, celle sur la lecture du volume ΔV est importante et est au moins égale ± 0.1 cm^3; dans ce cas les erreurs sur ρ_m et ρ_w sont (Roy, 1989):

$$\Delta \rho_m = \rho_m \left(\frac{\Delta M_m}{M_m} + \frac{\Delta V_m}{V_m} \right) \tag{4.4}$$

$$\Delta \rho_w = \rho_w \left(\frac{\Delta M_w}{M_w} + \frac{\Delta V_w}{V_w} \right) \tag{4.5}$$

Les erreurs sur les concentrations C_d et C_v sont calculées à partir des équations 4.2 et 4.3:

$$\frac{\Delta C_v}{C_v} = \frac{\Delta (\rho_m - \rho w)}{(\rho_m - \rho_w)} + \frac{\Delta (\rho_s - \rho_w)}{(\rho_s - \rho_w)} \tag{4.6}$$

$$\frac{\Delta C_d}{C_d} = \frac{\Delta C_v}{C_v} + \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} \tag{4.7}$$

avec: $\Delta(\rho_m - \rho_w) = \Delta\rho_m + \Delta\rho_w$ et $\Delta(\rho_s - \rho_w) = \Delta\rho_s + \Delta\rho_w$

Par exemple si nous considérons une suspension de masse M_m = 98.21 g qui occupe un volume V_m = 97 cm³ et qu'une mesure de la masse volumique de l'eau donne M_w = 91.47 g et V_w = 92 cm³, ce qui correspond à: ρ_m= 1.01247 g/cm³ et ρ_w= 0.99424 g/cm³. Les concentrations massique C_d et volumique C_v sont respectivement égales à 29.3 g/l et 0.01114 d'après les équations 4.2 et 4.3. Les équations 4.4 et 4.5 donnent avec $\Delta M_m = \Delta M_w$ = 0.01 g et $\Delta V_m = \Delta V_w$ = 0.1 cm³:

$$\Delta\rho_m = 0.0114 \text{ g/cm}^3 \quad \text{et} \quad \Delta\rho_w = 0.00119 \text{ g/cm}^3$$

et les erreurs relatives sur les concentrations sont calculées d'après les équations 4.6 et 4.7:

$$\frac{\Delta C_v}{C_v} = 0.14 \quad et \quad \frac{\Delta C_d}{C_d} = 0.15$$

Dans cet exemple, l'erreur $\Delta\rho_s$ sur la masse volumique des particules de sol est prise égale à 0.02 g/cm³ généralement admise en mécanique des sols.

L'ordre de grandeur des erreurs relatives sur les concentrations évalué à 14 et 15 % est important et il peut être dû à:

1- l'erreur de lecture des volumes sur l'éprouvette qui est non moins importante,

2- l'effet de l'eau non désaérée qui tend à surestimer les volumes dans l'éprouvette,

3- la faible concentration en particules solides; ce qui a pour effet de réduire la différence entre les masses volumiques des mixtures et de l'eau.

4.4.6 Difficultés rencontrées

Si les mesures des caractéristiques physiques des géotextiles ont été réalisées selon les normes déjà établies ou admises, celles relatives aux essais de filtration de suspensions ne sont pas obtenues sans quelques difficultés. En effet, et indépendamment des quantités de sol tamisées à sec pour les besoins du programme expérimental, il faut dire que les mesures des concentrations demandent beaucoup plus de minuties quant aux lectures de volumes dans l'éprouvette utilisée. Lors des essais préliminaires, on a constaté beaucoup d'imprécisions dues à la graduation des éprouvettes; celà a permis le choix d'une seule éprouvette pour les mesures des masses volumiques des suspensions et de l'eau.

4.5 Principe de mesure du pourcentage de passants cumulés

À partir des résultats obtenus sur les concentrations des passants en fonction du temps ($C_d = f(t)$) et qui sont tous présentés en annexe IV, nous pouvons déduire facilement les variations des pourcentages cumulés des particules de sol passant en fonction du temps.

En effet, la surface délimitée par la courbe $C_d = f(t)$ et l'axe des temps t (fig. 4.6) multipliée par le débit moyen d'écoulement durant l'essai donne la masse totale du sol qui passe à travers le géotextile. Si à chaque intervalle de temps compris entre t1 et t2, les concentrations C_d mesurées sont égales respectivement à C_{d1} et C_{d2}, alors en supposant une variation linéaire de C_d entre t1 et t2, la masse de sol M_{12} passant entre t1 et t2 est le produit de la surface du trapèze délimité par t1, t2, C_{d1} et C_{d2} multipliée par le débit q2 mesuré à l'instant t2:

$$M_{12} = \frac{(C_{d1} + C_{d2}) \cdot (t2 - t1) \cdot q_2}{2} \qquad (4.8)$$

Entre t = 0 et t = 12 min, il n'y a pas de mesures de concentrations; dans ce cas, nous supposons une variation linéaire de C_d dans cette intervalle de temps et la masse de sol correspondante est la surface du triangle hachuré dans la figure 4.6. La masse de sol passant cumulée à l'instant t est la somme de toutes les masses Mp passant durant tous les intervalles de temps compris entre t = 0 et t = t.

Le pourcentage de passant cumulé à l'intervalle de temps t est donné par le rapport de la masse de passant cumulé Mp entre t = 0 et t = t sur la masse totale M_t de sol en suspension se présentant au filtre pendant le temps t. Cette dernière masse de sol est le produit de la concentration initiale C_0 par le volume de suspension arrivant au filtre et qui est égal au produit du débit moyen de l'essai par le temps t:

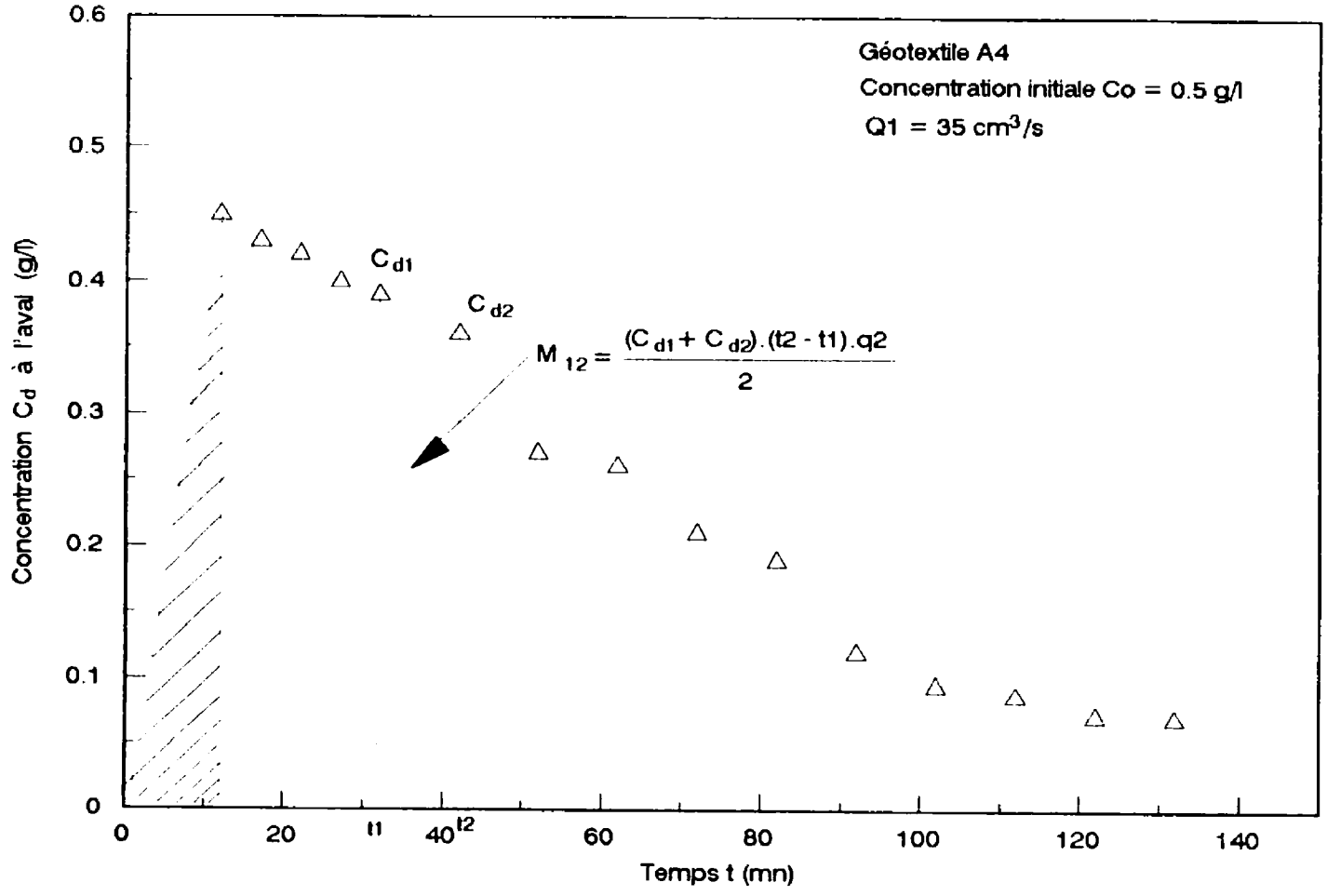


Figure 4.6 Variation de C_d en fonction du temps, calcul de Pa_{mes}

$$M_t = C_0 . Q . t \qquad (4.9)$$

Le tableau 4.2 présente un exemple de calcul du pourcentage de passant cumulé mesuré Pa_{mes} à partir des mesures de $C_d = f(t)$ du tableau 4.1. Ainsi donc le pourcentage de passants cumulé mesuré à la fin de l'essai de filtration donne l'efficacité de filtration de chaque géotextile testé et qui est par définition même le complément par rapport à 1 de ce pourcentage de passants:

$$E_{mes} = 1 - Pa_{mes} \qquad (4.10)$$

L'analyse des résultats concernant le paramètre de rétention des particules de sol en suspension par les géotextiles non tissés étudiés est présenté dans le chapitre 5 en terme de variation de $Pa_{mes} = f(t)$ et en terme d'efficacité de filtration. Ces résultats seront particulièrement confrontés à ceux obtenus par les modèles de prédiction établis dans le chapitre 3.

4.6 Principe de mesure des granulométries

À la fin de chaque essai de filtration et après vidange des compartiments amont et aval, un échantillon de sol passant à travers le filtre géotextile est récupéré pour fin d'analyse granulométrique. La granulométrie du passant est déterminée à partir de l'essai classique

Tableau 4.2 Pourcentages de passants mesurés de l'essai de filtration No 4

Essai de filtration No 4, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3 /s

Date: 22 Mars 1994 — Géotextile: A4

Temps t (min) (1)	Intervalles de temps Δt (s) (2)	Débits Q (cm^3/s) (3)	Cd (g/l) (4)	Masse de passants Mp (g) (5)	Masse de passants cumulée (g) (6)	Masse totale arrivant au filtre (g) (7)	% Passants mesurés (%) (8)
12	720	37	0.45	5.99	5.99	12.6	47.5
17	300	34.33	0.43	4.53	10.52	17.9	58.8
22	300	34.67	0.42	4.42	14.94	23.1	64.7
27	300	34.67	0.40	4.26	19.21	28.4	67.6
32	300	34.67	0.39	4.11	23.32	33.6	69.3
42	600	34.67	0.36	7.8	31.20	44.1	70.7
52	600	34.67	0.27	6.55	37.67	54.6	69.0
62	600	34.67	0.26	5.41	43.08	65.1	66.2
72	600	35	0.21	4.83	47.91	75.6	63.3
82	600	35	0.19	4.2	52.11	86.1	60.5
92	600	34.67	0.12	3.22	55.33	96.6	57.2
102	600	34.67	0.095	2.24	57.57	107.1	53.8
112	600	34.67	0.087	1.92	59.49	117.6	50.6
122	600	34.67	0.072	1.68	61.18	128.1	47.8
132	600	34.67	0.07	1.48	62.66	138.6	45.20

Première valeur de Mp = surface du triangle = 0.45*720*37*0.001)/2 = 5.99

Deuxième valeur de Mp = surface du trapèze = (0.45+0.43)*300*34.33*0.001)/2=4.53

(7) = (1)*60*35*0.5*0.001

(8) = (6)/(7)

de sédimentométrie selon la norme ASTM D422-63. Il faut signaler que la prise d'échantillon de sol est réalisée environ 30 min après la vidange du canal à partir de la quantité de sol qui a sédimenté pendant cette période. Il reste encore une fraction de fines particules non négligeable en suspension qui ne peut être récupérée qu'après séchage à l'étuve. Or, cette opération s'est avérée impossible à réaliser étant donné les volumes très élevés de suspension à sécher. On verra que cette situation va légèrement réduire la fraction de fines particules dans les granulométries mesurées, ce qui a pour effet de provoquer un décalage entre ces granulométries et celles obtenues par le modèle de prédiction Gr(d).

4.7 Principe de mesures du degré de colmatage des géotextiles

Dans la littérature étudiée, la notion de colmatage a été surtout étudiée sous l'aspect de variation des paramètres de la perte de charge en fonction du temps (Mlynarek, 1989 et El-Amir, 1991), de la réduction de la vitesse (Hoogendoorn et Van der-Meulen, 1977 et Atmatzidis et al., 1982) et de la réduction du pourcentage des passants en fonction du temps (Gendrin, 1991).

Dans la théorie développée au chapitre 3 permettant la prédiction du colmatage, nous avons déterminé le degré de colmatage interne $\Delta n/n$ théorique des 6 géotextiles non tissés aiguilletés étudiés. Ce modèle est valide pour des concentrations initiales en particules solides en suspension C_0 ne dépassant pas 5 g/l. Ce colmatage interne est

caractérisé par le bourrage (total ou partiel) du volume des pores à l'intérieur des filtres géotextiles et sa mesure physique est définie comme étant la variation relative de la porosité avant et après filtration. En ce qui concerne la rétention des particules à la surface du géotextile (première nappe), elle se caractérise par la formation d'une couche de sol formant un gâteau ("cake") d'épaisseur T_c engendrant un colmatage de surface.

Connaissant l'épaisseur des géotextiles T_g, on peut déduire éventuellement celle du gâteau T_c formé à la surface du filtre par mesure de l'épaisseur totale T_{gc}, du système sol-géotextile obtenue à la fin des essais (fig. 4.7):

$$T_c = T_{gc} - T_g \qquad (4.11)$$

La mesure de l'épaisseur T_{gc} du système sol-géotextile récupéré après chaque essai de filtration est faite par mesure directe à l'aide d'un comparateur selon la norme utilisée pour la mesure de T_g du géotextile. L'échantillon sol-géotextile récupéré selon la procédure décrite ci-dessous est préalablement séché à l'air libre pendant 36 heures. Cette façon de faire engendre évidemment des erreurs relativement importantes compte tenu de la perte de sol due au remaniement et observée lors des différentes opérations de coupage, de pesée et de manutention des échantillons. Cependant, cette opération est réalisée beaucoup plus dans le but de faire des observations microscopiques des géotextiles après filtration afin de visualiser la répartition des particules de sol à la

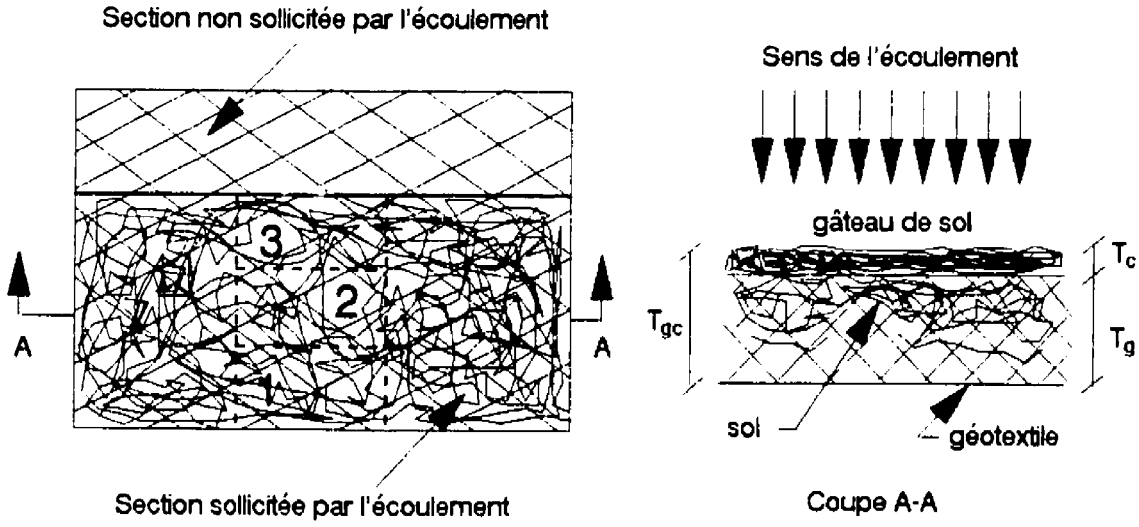


Figure 4.7 Principe de mesure du colmatage interne et de surface d'un géotextile en filtration de suspension

surface et à l'intérieur des filtres analysés. Ceci ne nous a pas empêché de mesurer le degré de colmatage interne et de le comparer avec les résultats théoriques obtenus dans le chapitre 3.

Le degré de colmatage interne $\Delta n/n$ suppose la connaissance de la porosité finale n_f à la fin de l'essai de filtration:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{n - n_f}{n} = 1 - \frac{n_f}{n} \qquad (4.12)$$

La porosité finale n_f est fonction de la quantité de sol piégée à l'intérieur du filtre géotextile. Celle-ci dépend de la masse totale du système sol-géotextile et de la masse de sol du gâteau à la surface du géotextile. Si M_{sg} est la masse de sol piégée à l'intérieur du géotextile, elle est liée au volume V_{sg} de ce sol par la relation:

$$V_{sg} = \frac{M_{sg}}{\rho_s} \qquad (4.13)$$

et la porosité finale n_f devient égale à:

$$n_f = n - \frac{V_{sg}}{V_g} \qquad (4.14)$$

La masse M_{tg} est obtenue par la différence entre la masse totale d'un échantillon de géotextile après essai de filtration et la somme des masses du filtre vierge M_f et de la masse de sol du gâteau de surface M_{sc}. Toute la difficulté est donc d'estimer cette masse du gâteau M_{sc} ou de son volume V_{sc} puisqu'ils sont fonction de sa porosité n_c. Nous supposons une valeur de n_c égale à 0.5 qui est une valeur maximale généralement admise en mécanique des sols:

$$M_{sc} = V_{sc} \cdot \rho_s \qquad (4.15)$$

avec V_{sc} égal à:

$$V_{sc} = (1 - n_c) \cdot V_c \qquad (4.16)$$

où V_c est le volume du gâteau de sol à la surface du géotextile et qui est égal au produit de la section de l'échantillon prélevé par l'épaisseur du gâteau T_c.

À la fin de chaque essai de filtration, la surface du filtre obtenue est divisée en 3 sections à l'aide de cylindres creux et dont la base peut être circulaire de 5 ou 3 cm de diamètre, ou carrée de 4 à 6 cm de côté. Ces cylindres sont taillés à leur base de telle façon à servir comme lames à couper. Afin de réduire au maximum les remaniements des échantillons, ces cylindres sont chauffés à des températures très élevées et la coupe se fait par pression verticale sur les sections numérotées de bas en haut, de 1 à 3 (fig. 4.7). Les échantillons sont pesés avant la mesure de l'épaisseur T_{gc}. Les résultats de mesure et les calculs détaillés concernant chaque section sont présentés dans l'annexe VII

mais l'analyse discutée dans le chapitre 5, ne concerne que les sections intermédiaires N° 2.

Enfin, les observations au microscope des géotextiles plus ou moins colmatés récupérés à la fin de chaque essai de filtration sont faites à partir de certains échantillons qui sont au préalable saturés avec de la résine époxy. Des coupes normales à la surface du système sol-géotextile solidifié doivent être bien polies avant passage au microscope électronique à balayage présenté au paragraphe 3.3.2.1. Nous présentons au chapitre 5 les photos des visualisations microscopiques sur les échantillons des géotextiles A3 et A2 après certains essais de filtration à C_0 = 0.5 et 5 g/l.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE

5.1 Introduction

Nous avons établi, au chapitre 3, un modèle de simulation de filtration de suspensions permettant de prédire l'efficacité de filtration, la granulométrie du sol passant à travers les géotextiles non tissés aiguilletés ainsi que le degré de colmatage. Cette simulation est basée sur les probabilités de passage des particules de sol à partir d'un modèle de structure adopté et vérifié expérimentalement. Dans le but de valider les résultats théoriques obtenus à partir de cette approche, nous présentons, dans ce chapitre, les résultats obtenus dans le programme expérimental qui a été établi, bâti et réalisé selon la méthodologie et les principes décrits dans le chapitre 4. Ainsi, la structure des différentes interprétations obéit à celle adoptée dans les chapitres précédents:

- L'analyse des résultats des essais de filtration de suspensions permet de discuter de l'influence des paramètres de l'ouverture de filtration, de la concentration initiale en particules solides et du débit d'écoulement sur les passants Pa (ou P) et les efficacités de filtration E. Cette partie est complétée par la discussion de la validité des résultats théoriques obtenus par la simulation de l'essai de filtration de suspensions,

- L'analyse des résultats concernant les granulométries Gr(d) du sol obtenu à l'aval des

géotextiles après filtration, permet d'établir les conditions de validité des modèles de P et de Gr(d).

- Évaluation des degrés de colmatage des géotextiles étudiés et comparaison avec les résultats théoriques.

5.2 Résultats et analyse des essais de filtration de suspensions

Pour chacun des 6 géotextiles A et B, nous avons réalisé 6 séries d'essais de filtration de suspensions correspondant à des concentrations initiales C_0 égales à 0.5, 1, 2.5, 5, 10 et 20 g/l. Le débit d'écoulement de ces essais est constant et est égal à Q1 (= 35 cm^3/s). Deux autres séries d'essais, correspondant chacune à C_0 = 0.5, 1, 2.5 et 5 g/l, ont été réalisées, sur le géotextile A3, avec des débits d'écoulement plus élevés Q2 et Q3 égaux respectivement à 70 et 105 cm^3/s. Ceci nous permet d'étudier l'influence du débit d'écoulement (ou vitesse d'écoulement) sur le paramètre de l'efficacité de filtration. L'appareillage utilisé est celui décrit au chapitre 4 (fig. 4.1 et 4.2). Tous les résultats des mesures de concentrations C_d obtenues à l'aval des géotextiles sont présentés dans l'annexe IV. Les mesures de C_d nous permettent de déduire, selon le principe de calcul décrit au chapitre 4, et de présenter les résultats sous la forme de pourcentages de passants Pa en fonction du temps (annexe V).

Les résultats obtenus sur les granulométries des passants à travers les géotextiles A pour

des C_0 variant de 0.5 à 5 g/l sont rapportés afin de montrer que le processus de rétention des particules peut se manifester sous une autre forme selon les paramètres de l'ouverture de filtration FOS et de la concentration initiale C_0.

Enfin, la dernière partie de notre analyse concerne les résultats obtenus sur les degrés de colmatage des géotextiles étudiés. Tous les détails de calcul sont présentés dans l'annexe VII.

5.2.1 Pourcentage de passants et efficacité de filtration

Nous avons vu, dans le chapitre 4, que tous les essais de filtration de suspensions sont caractérisés par deux phases d'écoulement:

- Une phase transitoire correspondant à la période de remplissage du compartiment aval du canal expérimental: cette phase dure entre 5 et 12 min selon le débit d'écoulement Q. L'essai commence avec le remplissage du canal (amont et aval) à t = 0 et la suspension arrivant au compartiment amont du géotextile à une concentration initiale C_0 constante, engendre une résistance à l'écoulement du filtre, particulièrement pendant les 2 premières minutes. En effet, une perte de charge ΔH maximale est observée entre l'amont et l'aval. Dans les essais à débit Q1 = 35 cm^3/s, les géotextiles A donnent un ΔH variant de 1 à 2.5 cm pour C_0 = 0.5 g/l (fig. 5.1), de 3 à 6 cm pour C_0 = 5 g/l (fig. 5.2) et de 2 à 5 cm à C_0 = 10 g/l (fig. 5.3). Le géotextile B2, caractérisé par une

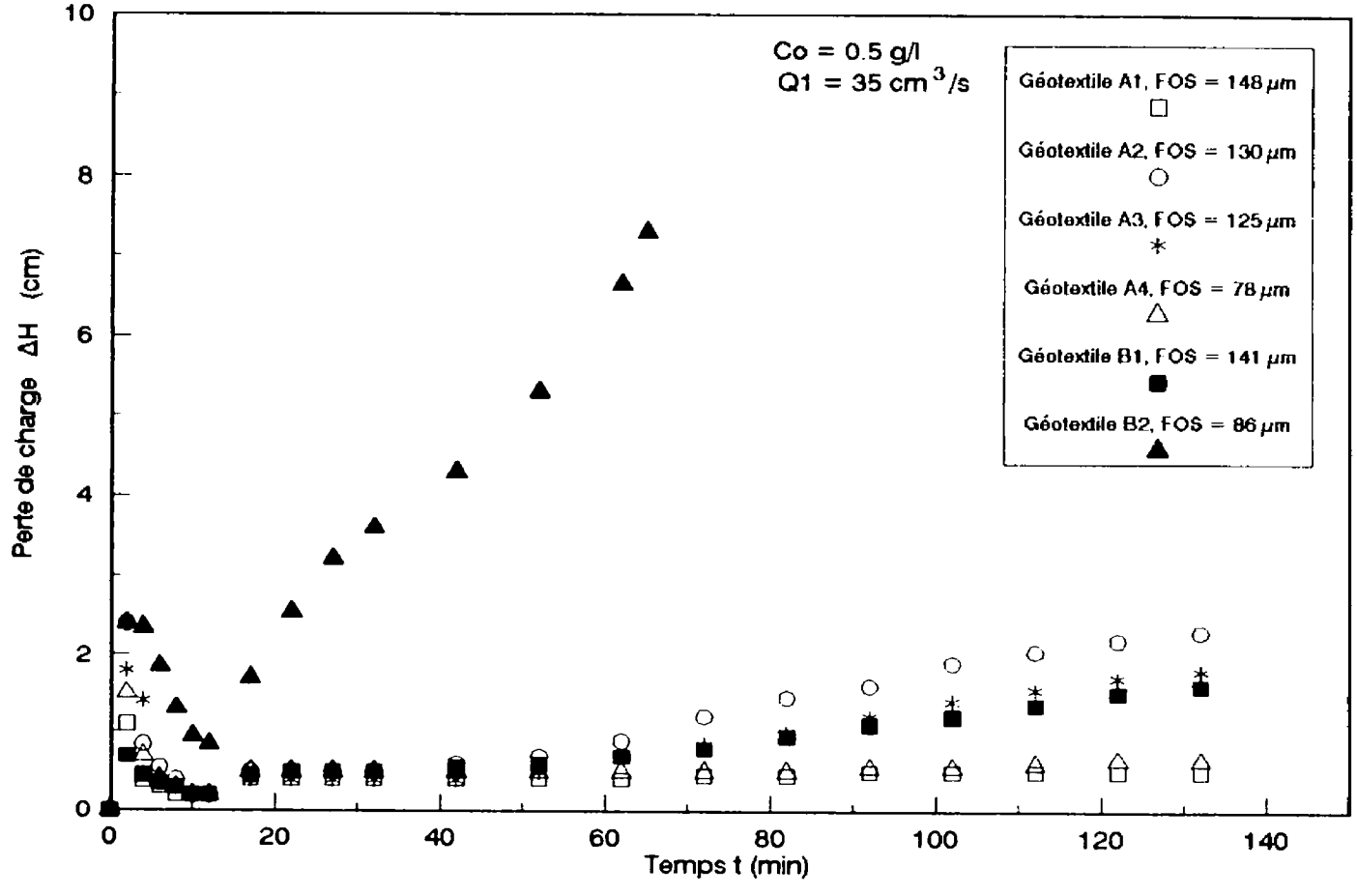


Figure 5.1 Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3 /s

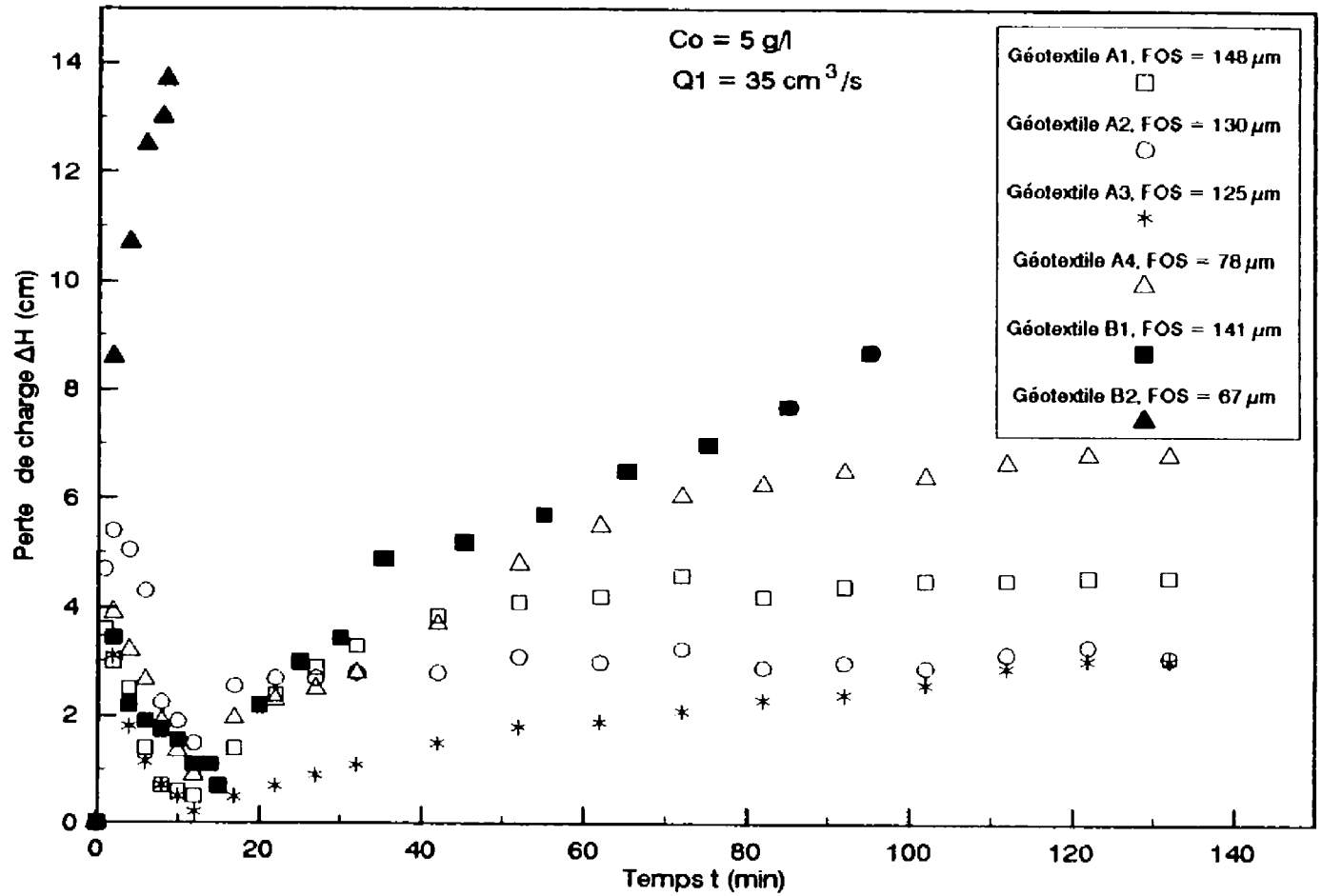


Figure 5.2 Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

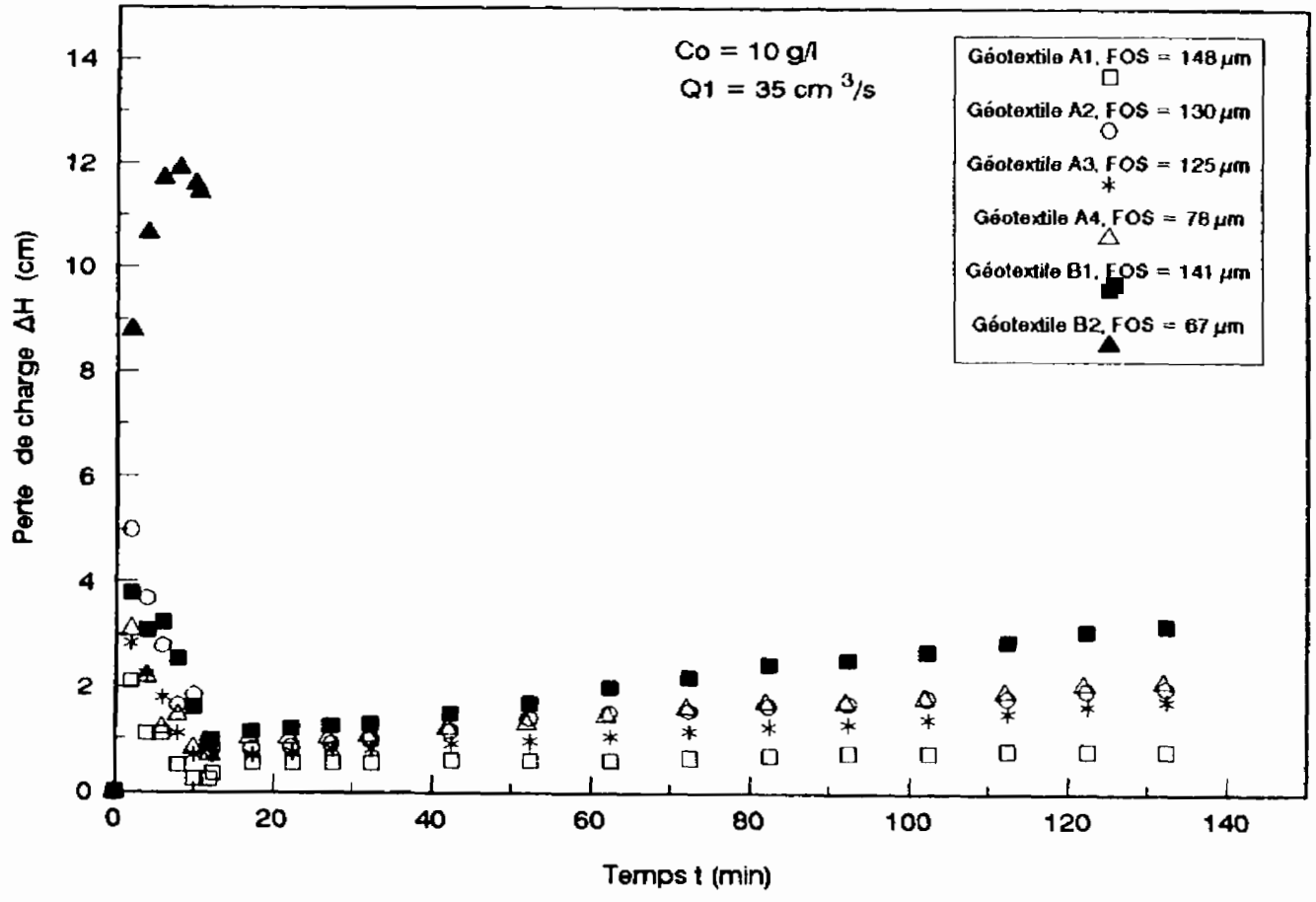


Figure 5.3 Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3 /s

porosité n relativement plus faible (= 0.89) et une ouverture de filtration beaucoup plus faible (= 67 μm), donne une perte de charge maximale variant de 2 à 14 cm selon les valeurs de C_0 (fig. 5.1 et 5.2). Dans tous les essais, ces valeurs maximales de ΔH diminuent pour atteindre un minimum ne dépassant pas 1 cm. Ceci est dû à la surface d'écoulement des géotextiles offerte et encore disponible au passage des particules. Les résultats des mesures des pertes de charge en fonction du temps de tous les essais sont présentés dans l'annexe III.

- Une phase permanente caractérisée par des débits d'écoulement constants: les essais durent environ 132 min avec un débit Q1 de 35 cm^3/s, 98 min avec Q2 = 70 cm^3/s et 65 min avec Q3 = 105 cm^3/s. Dans les figures 5.1 à 5.3, on remarque que les pertes de charge les plus élevées sont observées dans les essais à C_0 = 5 g/l (fig. 5.2). Nous verrons ci-dessous dans l'analyse des résultats expérimentaux, qu'à cette concentration un processus d'autofiltration est observé. Les pertes de charge très élevées peuvent être dues à cette structure de sol autofiltrante qui se construit à la surface des filtres géotextiles. Les valeurs de ΔH observées pour C_0 = 10 g/l (fig. 5.3) paraissent un peu faibles comparativement à celles observées à C_0 = 5 et 0.5 g/l. Ceci peut-être dû à l'effet d'entrainement des particules les unes sur les autres en arrivant en plus grand nombre au filtre géotextile.

À cause de sa faible porosité (n = 0.89) et une grande densité (masse volumique ρ_s = 125 kg/m^3, tab. 3.4), le géotextile B2 a tendance à se colmater beaucoup plus

rapidement. Dans le meilleur des cas, à C_0 = 0.5 g/l, les essais avec ce matériau n'ont pas dépassé 65 min (fig. 5.1) avec une perte de charge de 8 cm et, pour C_0 plus élevée, des valeurs encore plus élevées de ΔH (> 12 cm) sont observées même durant les premières minutes de remplissage du canal (fig. 5.2 et 5.3). Enfin, il faut remarquer que, d'une façon générale et pour un même C_0, les pertes de charge les plus élevées sont associées aux géotextiles ayant les plus faibles ouvertures de filtration FOS.

Dans les figures 5.4 à 5.6 sont présentées les variations des pourcentages cumulés en fonction du temps des passants à travers les géotextiles A et B à un débit d'écoulement Q1 = 35 cm^3/s. Ces pourcentages sont calculés en terme de rapport de masses de sol selon le principe décrit au chapitre 4, à partir des variations des concentrations C_d mesurées à l'aval des filtres en fonction du temps (C_d = f(t)) et présentées dans les annexes IV.1 à IV.8. Il est important de noter que ce sont des pourcentages cumulés (passants cumulés par rapport à la quantité de sol filtrée entre t = 0 et t = t) et non absolus (% de passants par rapport à la quantité de sol filtrée dans chaque intervalle de temps). L'objectif de cette façon de faire est d'estimer l'efficacité de filtration (ou le passant final) à la fin de l'essai, ce qui a pour conséquence de rendre la discussion et conclusion assez limitatives et de ne pas renseigner complètement sur le mécanisme de filtration durant l'essai. Cependant, l'allure de toutes les variations du passant en fonction du temps obtenues à partir des essais de filtration (fig. 5.4 à 5.10) fait dégager les observations suivantes:

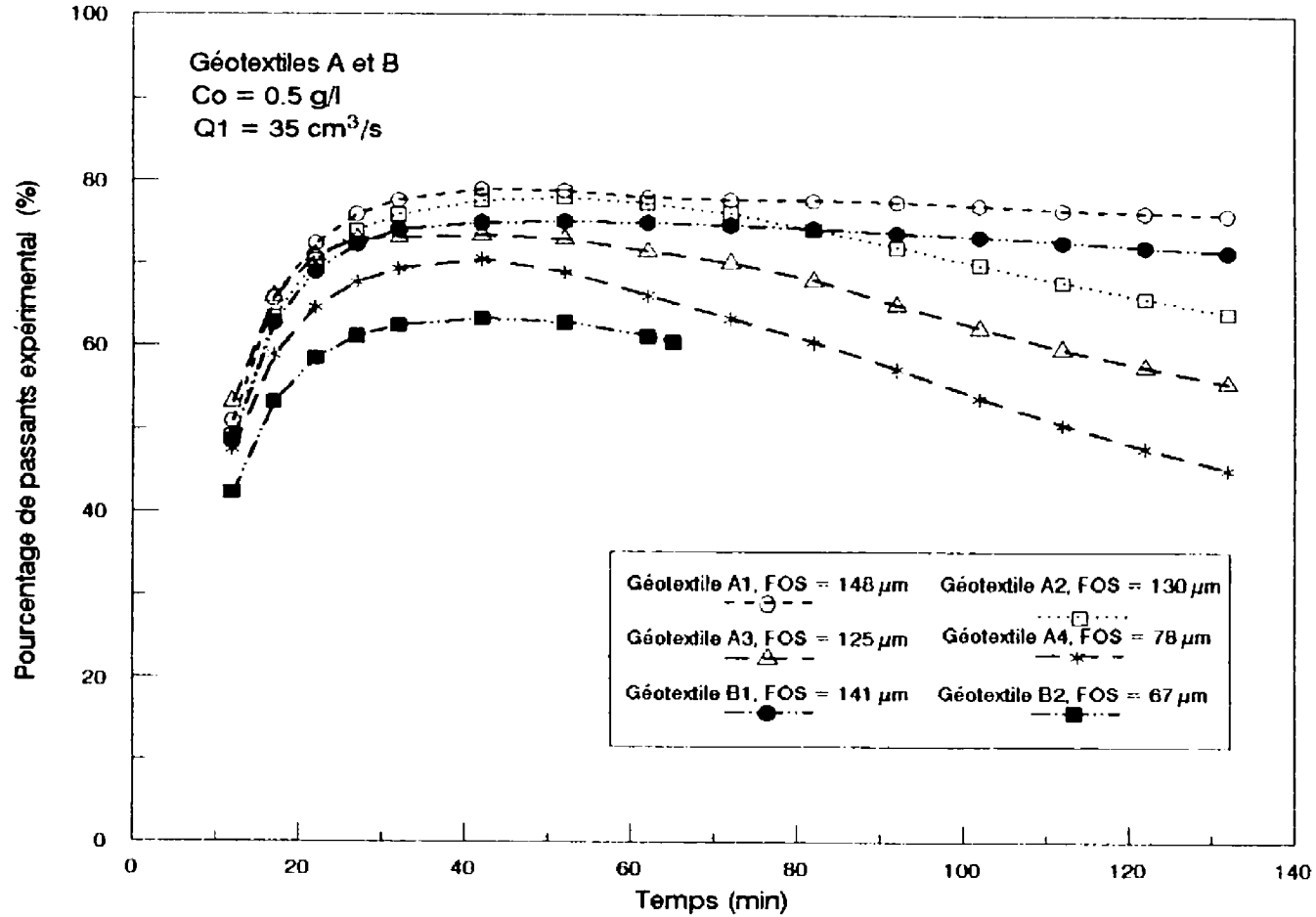


Figure 5.4 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B. Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

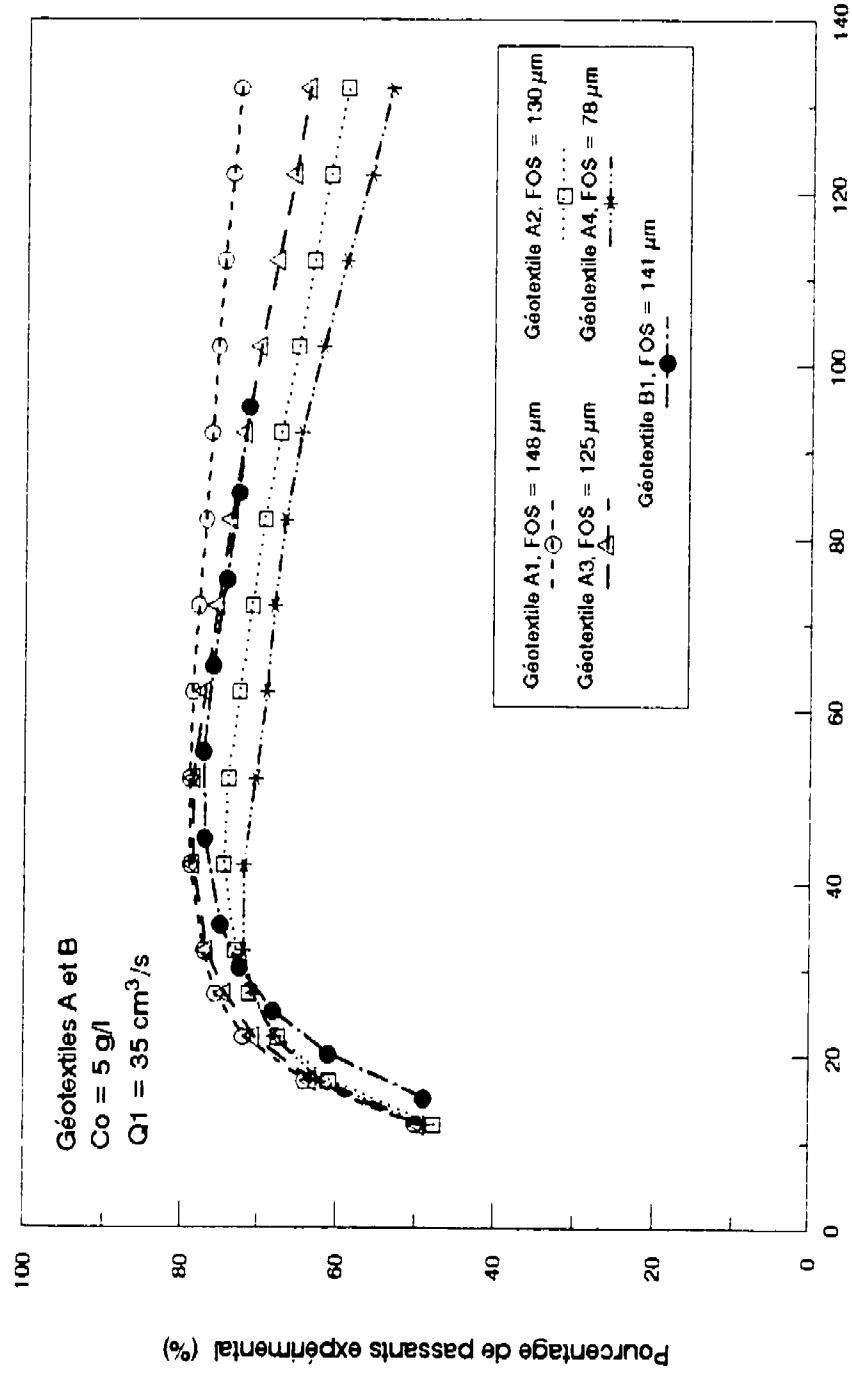


Figure 5.5 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm³/s

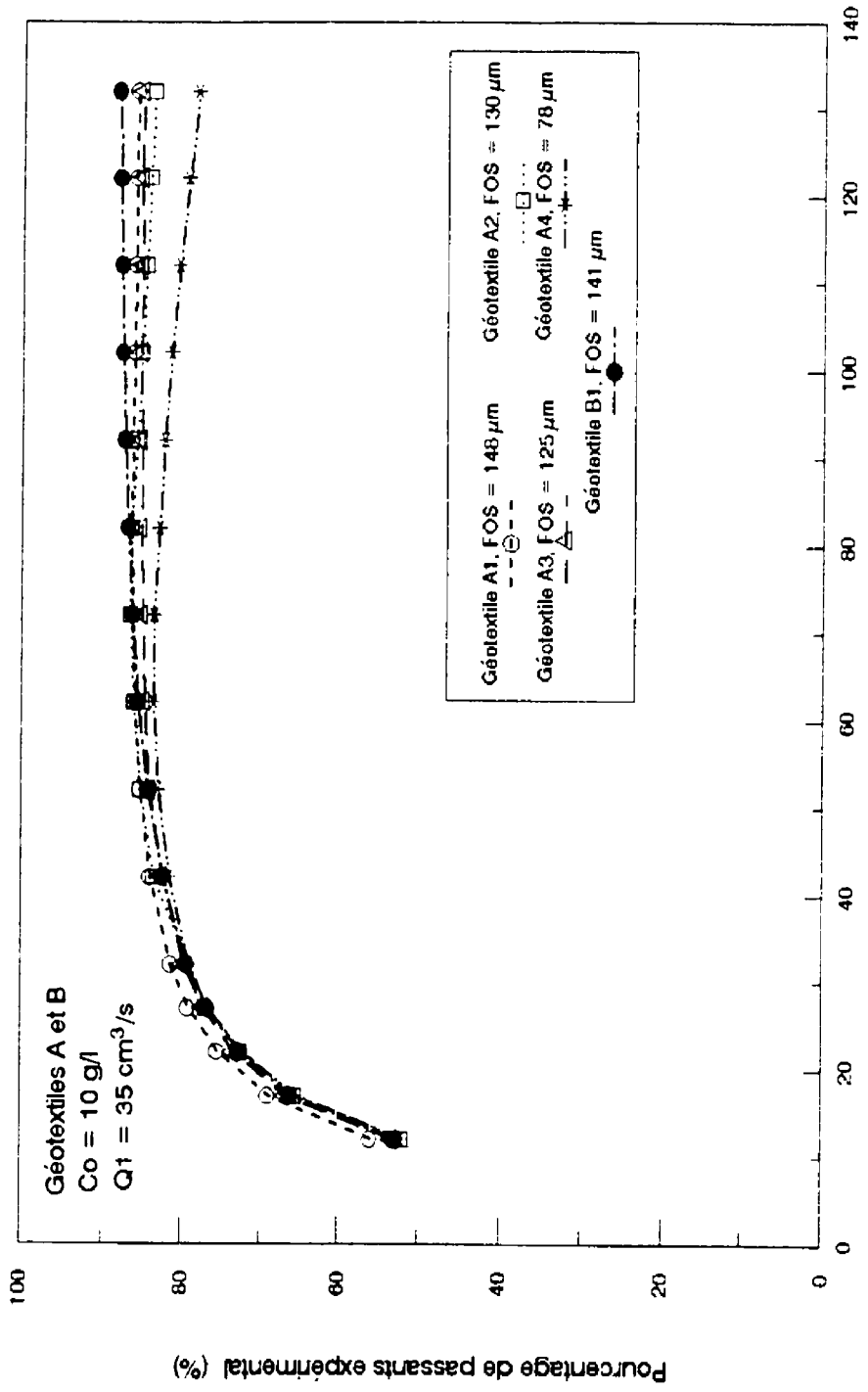


Figure 5.6 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

a- Au début du fonctionnement de la filtration, il y a une période transitoire caractérisée par une augmentation du passant due au passage des particules fines qui sont entrainées à l'extérieur du filtre, d'où faibles pertes de charge. Cette augmentation du passant atteint un maximum après 30 à 35 minutes de filtration pour les essais à Q1 = 35 cm^3/s (fig. 5.4 à 5.8), après 20 à 25 min pour les essais à Q2 = 70 cm^3/s (fig. 5.9) et seulement après 15 min pour les essais à Q3 = 105 cm^3/s (fig. 5.10). Pendant cette période transitoire, les grosses particules sont arrêtées à la surface du géotextile (amont du filtre) formant une structure autofiltrante qui assure à son tour la rétention des particules plus fines.

b- La formation de cette structure filtrante conduit à l'amorce d'un palier plus ou moins marqué selon l'ouverture de filtration FOS des géotextiles et la concentration initiale C_o en particules solides des suspensions. En effet, pour les essais à faible C_o (= 0.5 g/l, fig. 5.4) et pour les géotextiles A1 et B1 d'ouvertures FOS égales respectivement à 148 et 141 μm, la stabilisation apparait immédiatement après le pic caractérisant un pourcentage de passants constant. Pour les géotextiles à ouverture FOS plus petite (A3 et A4), le passant diminue très lentement après le pic, ce qui a pour effet de retarder l'apparition du palier de stabilisation. Ceci peut être dû à la faible probabilité de passage des particules fines à travers des ouvertures plus faibles. En ce qui concerne les essais à C_o = 5 g/l (fig. 5.5), après la période transitoire il y a diminution du passant avant d'atteindre le palier de stabilisation et ceci quelque soit l'ouverture FOS du géotextile. Dans ce cas, le processus d'autofiltration des particules fines par les grosses particules

arrêtées à la surface des filtres est plus marqué même pour les géotextiles à FOS plus élevés (A1 et B1). Dans les essais à C_0 = 10 g/l (fig. 5.6), l'effet d'entrainement des particules les unes sur les autres engendrerait probablement un pourcentage de passant très élevé et ceci quelque soit l'ouverture FOS et l'apparition du palier de stabilisation est indépendante de ce paramètre FOS.

En résumé, on peut dire qu'en général, l'évolution du pourcentage de passant cumulé en fonction du temps montre que les paliers de stabilisation sont plus ou moins amorcés dans la période de 132 minutes de filtration, ce qui permet d'obtenir et de discuter le paramètre de l'efficacité de filtration mesurée à la fin des essais de filtration et qui n'est autre que le complément par rapport à 1 (ou à 100 %) du pourcentage de passant cumulé (E = 1 - P). Les résultats expérimentaux des passants et des efficacités seront discutés ci-dessous en termes d'influence de l'ouverture de filtration FOS, de concentration initiale en particules solides C_0 et de validité du modèle théorique de l'efficacité de filtration. Aussi, pour éviter toute confusion, nous noterons dans ce qui suit, l'efficacité mesurée par E_{mes} et l'efficacité théorique par E_{th}.

5.2.1.1 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants et les efficacités de filtration

Dans le chapitre 3, nous avons mis en évidence l'influence de l'ouverture théorique C_{95} des conduits sur les efficacités de filtration. Aussi, il a été établi que ce paramètre de

l'efficacité ne dépend que de la structure du géotextile (n, T_g et d_f) et de la granulométrie du sol à filtrer. Plus les ouvertures théoriques C_{95} sont élevées, plus grands sont les pourcentages de passants moindre est l'efficacité de filtration (tab. 3.5). Dans les figures 5.4 à 5.6, cette tendance est très bien marquée quelque soit la concentration initiale en particules solides C_0, particulièrement les géotextiles A où les essais de filtration ont tous duré 132 min.

Pour les tests à C_0 = 0.5 g/l (fig. 5.4), les efficacités mesurées varient de 25 % pour A1 (FOS = 148 μm) à 55 % pour A4 (FOS = 78 μm). Le géotextile B2 donne une efficacité de 40 % après seulement 65 min mais avec un risque au colmatage très élevé (perte de charge ΔH = 7.5 cm, fig. 5.1). Le comportement filtrant de ce matériau est dû essentiellement à sa faible porosité (n = 0.89) mais aussi, et surtout, à son ouverture de filtration qui, certainement, est la plus faible et égale à 67 μm. En effet, le géotextile B2, ayant une épaisseur T_g égale à 3.5 mm et comprise entre celles de A3 et A4 (= respectivement à 3.2 et 4.1 mm), confirme la tendance de la réduction des ouvertures à porosité plus faible (§ 3.2.3). Cette réduction des ouvertures affaiblit ou diminue la probabilité de passage des particules.

Pour les essais à C_0 = 5 g/l (fig. 5.5), les mêmes ordres de grandeurs des efficacités mesurées sont observés en fonction de FOS. E_{max} est comprise entre 27 et 47 % pour des FOS variant entre 148 et 78 μm (A1 et A4 respectivement). À cette concentration, l'essai avec le géotextile B2 a été arrêté pendant la période de remplissage suite à une

perte de charge très élevée.

En ce qui concerne les efficacités à C_0 = 10 g/l, la figure 5.6 montre que les pourcentages de passants sont très élevés et tous supérieurs à 78 % à partir de la 25ème minute de l'essai et jusqu'à la fin de celui-ci, ce qui correspond à des efficacités mesurées très faibles et inférieures à 22 %. Aux ouvertures de filtration FOS plus faibles sont associées les plus grandes efficacités de filtration (E_{mes} de A4, égale à 22 % pour un FOS de 78 μm) mais cette influence est moins marquée que celle observée dans les essais à $C_0 \leq 5$ g/l.

Le tableau 5.1 montre tous les résultats des efficacités de filtration mesurées des géotextiles A et B avec un débit d'écoulement Q1 = 35 cm³/s. On remarque que, quelque soit C_0, plus FOS est élevée, moindre est l'efficacité de filtration. À première lecture, ces valeurs de E_{mes} paraissent faibles mais il faut rappeler que le sol en suspension utilisé est un sol fin limoneux-argileux ayant un diamètre moyen d_{50} égal à 41 μm, c'est-à-dire 50 % des particules ont un diamètre inférieur à 41 μm. Les résultats obtenus avec ce sol montrent des efficacités supérieures à 50 % atteintes avec les géotextiles A4 et B2 (pour $C_0 \leq 5$ g/l). Ayant des ouvertures FOS respectives de 78 et 67 μm, ces matériaux donnent un rapport géométrique FOS/d_{50} égal respectivement à 1.9 et 1.63 comparativement aux autres valeurs de ce paramètre toutes supérieures à 3.

Enfin, il faut signaler, qu'à ce stade de l'interprétation, l'influence du temps de

remplissage du canal expérimental au début des essais est négligeable sur les valeurs finales des pourcentages de passants et des efficacités de filtration mesurées. Ceci est justifié par le fait que ces pourcentages sont des pourcentages cumulés obtenus à partir de l'aire des courbes $C_0 = f(t)$ présentées dans l'annexe IV. Cependant, cette influence apparaitra certainement lors de la comparaison de ces résultats avec les pourcentages de passants théoriques établis au chapitre 3.

Tableau 5.1 Efficacités de filtration mesurées E_{mes} des géotextiles A et B, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
C_0 = 0.5 g/l	25	36	45	55	29	40 **
C_0 = 1 g/l	30	36	49	52	34	71***
C_0 = 2.5 g/l	32	44	54	59	34	57****
C_0 = 5 g/l	27	41	37	47	29*	-
C_0 = 10 g/l	14	16	15	22	12	-
C_0 = 20 g/l	6	5	8	12	5	-

* B1, essai ayant duré 105 min,
** B2, essai ayant duré 65 min, *** B2, essai ayant duré 17 min, **** B2, essai ayant duré 30 min.

5.2.1.2 Influence de la concentration initiale sur les passants et les efficacités de filtration

Afin de discuter l'influence de la concentration initiale en particules solides C_0 sur les efficacités de filtration, nous présentons dans les figures 5.7 à 5.10 les variations des pourcentages de passants pour différents débits d'écoulement.

Pour Q1 = 35 cm^3/s, les figures 5.7 et 5.8 montrent respectivement les résultats concernant les géotextiles A2 et A4. Pour un même matériau, on remarque qu'il y a deux niveaux d'influence des concentrations initiales sur les passants. En effet, pour un $C_0 \leq 5$ g/l, la concentration initiale influence très peu les efficacités de filtration. Pour A2 (FOS = 130 μm), celles-ci sont comprises entre 36 et 44 % (passant final entre 64 et 56 %) quelque soit $C_0 \leq 5$ g/l (fig. 5.7). Pour le géotextile A4, dont le FOS est égal à 78 μm, les efficacités de filtration mesurées à la fin des essais varient entre 47 et 59 % avec un maximum pour C_0 = 2.5 g/l (fig. 5.8). L'allure des courbes de passants en fonction du temps montre que pour ces deux géotextiles (fig. 5.7 et 5.8), le palier de stabilisation n'est pas encore tout-à-fait marqué et que le passant peut continuer encore à diminuer au delà de la période de 132 min, ce qui ferait encore améliorer ou augmenter les valeurs des efficacités de filtration. Pour des C_0 égales à 10 et 20 g/l, les mêmes figures montrent que les efficacités sont deux fois plus petites quand C_0 est multiplié par deux; mais elles restent tout-de-même très faibles, variant entre 5 et 22 % même pour une ouverture de filtration relativement plus faible (FOS de A4 = 78 μm).

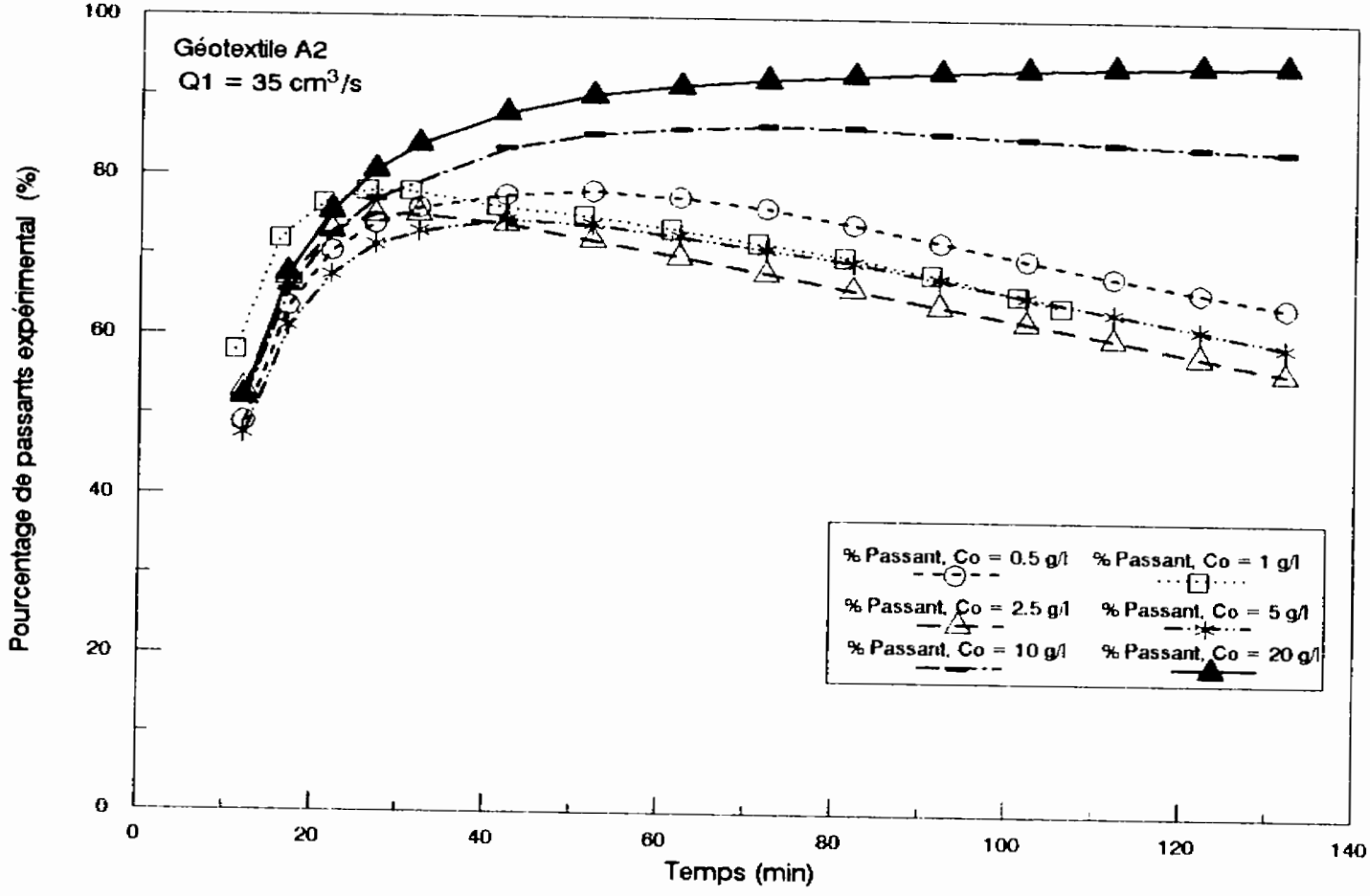


Figure 5.7 Influence de la concentration initiale Co sur les passants, géotextile A2, Q1 = 35 cm^3/s

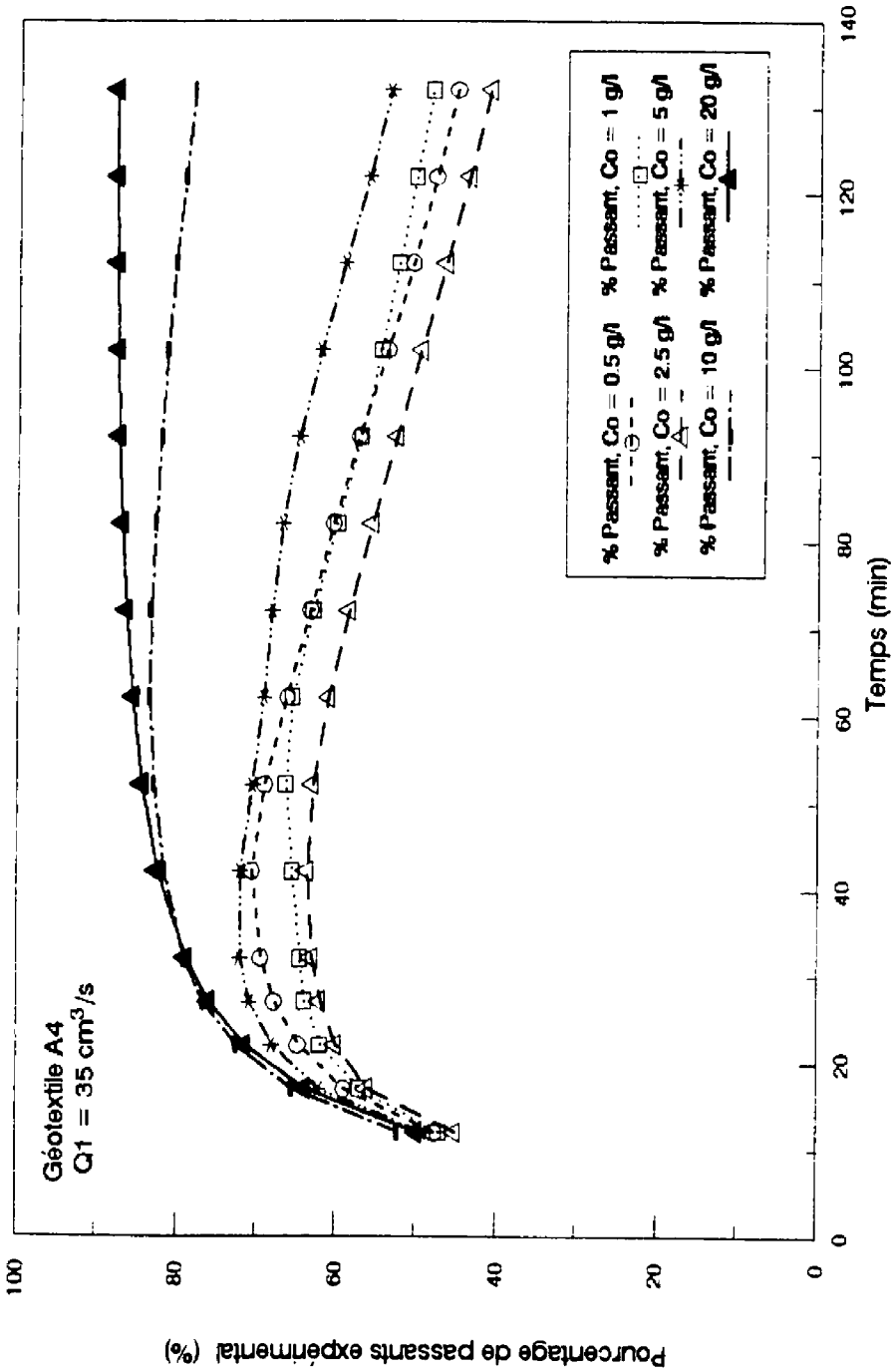


Figure 5.8 Influence de la concentration initiale Co sur les passants, géotextile A4, Q1 = 35 cm³/s

Pour les essais avec des débits d'écoulement plus élevés (Q2 = 70 et Q3 = 105 cm^3/s), les résultats obtenus (fig. 5.9 et 5.10) à partir des tests réalisés sur le géotextile A3 et avec des concentrations initiales C_0 variant de 0.5 à 5 g/l, montrent qu'il n'y a pas d'influence de C_0 sur les efficacités de filtration. Toutes les valeurs de E_{mes} sont comprises entre 40 et 57 %.

Le tableau 5.1 présente tous les résultats de E_{mes} des géotextiles A et B obtenus avec Q1 = 35 cm^3/s. On remarque que, pour un même matériau, les efficacités sont très comparables pour des C_0 variant de 0.5 à 5 g/l. Cependant, on rappelle qu'à 5 g/l, des pertes de charge relativement très élevées (fig. 5.2) sont observées dans toutes ces séries d'essais. On peut donc dire, qu'à cette limite de concentration initiale en particules solides des suspensions, ou du moins comprise entre 2.5 et 5 g/l, il y a formation d'une couche autofiltrante à la surface des filtres géotextiles où les grosses particules, ayant une probabilité de passage plus faible, vont arrêter les particules plus fines dont, initialement, leur pourcentage est de l'ordre de 15 % (particules inférieures à 10 μm, fig. 3.19). Nous verrons lors de l'analyse des granulométries des passants, que la diminution de fines particules après filtration dépend aussi de l'ouverture de filtration des géotextiles et leur rétention à l'amont fait augmenter légèrement les efficacités mesurées à C_0 = 5 g/l. Cette limite de C_0 peut être comparée à celle observée dans les travaux de El-Amir (1991) où, pour un géotextile non tissé aiguilleté ayant une ouverture de filtration FOS égale à 135 μm, une augmentation très marquée de la perte de charge en terme de surpression, a été observée pour des C_0 > 4 g/l (fig. 2.24).

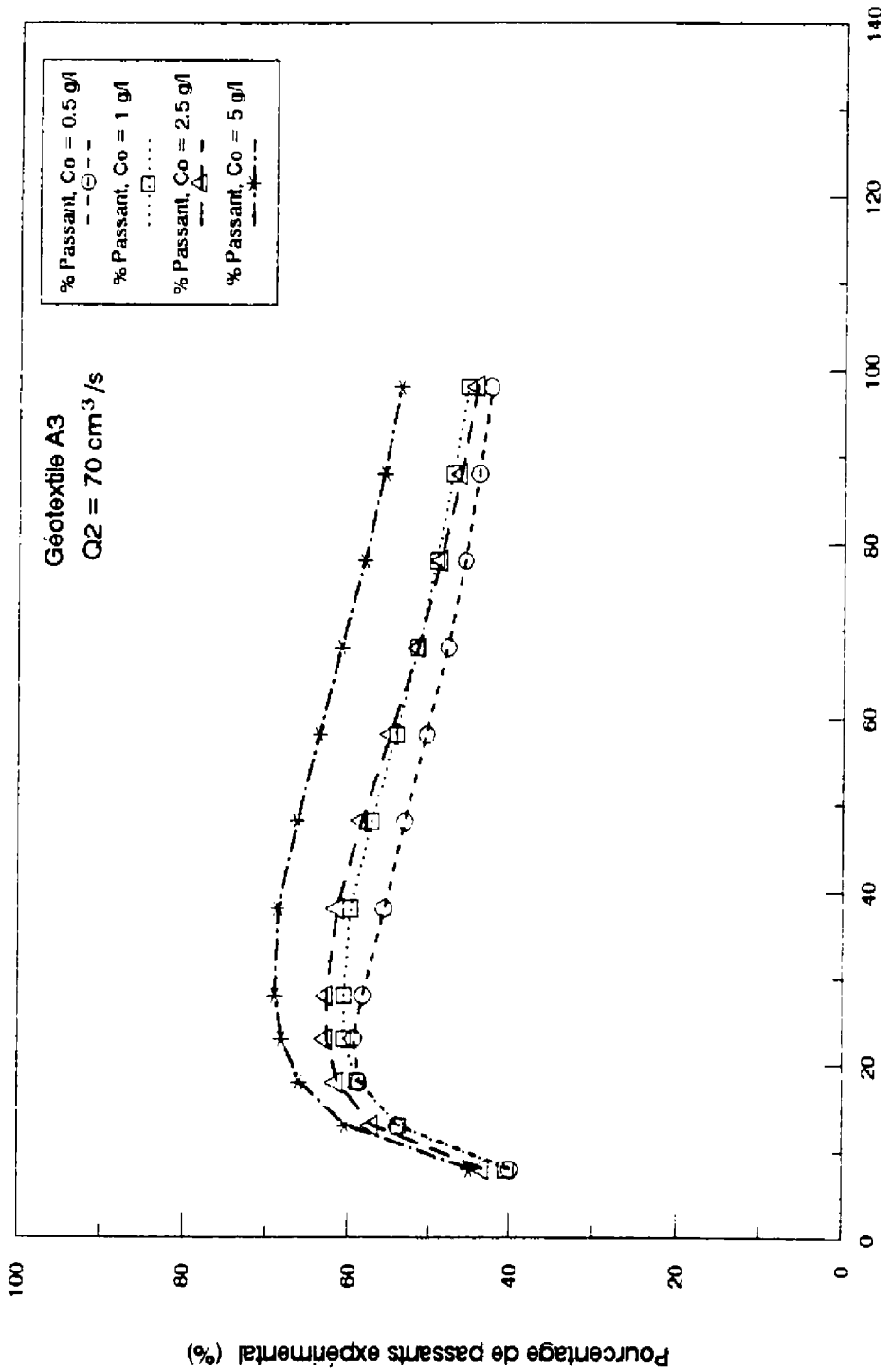


Figure 5.9 Influence de la concentration initiale Co sur les passants, géotextile A3, Q2 = 70 cm^3/s

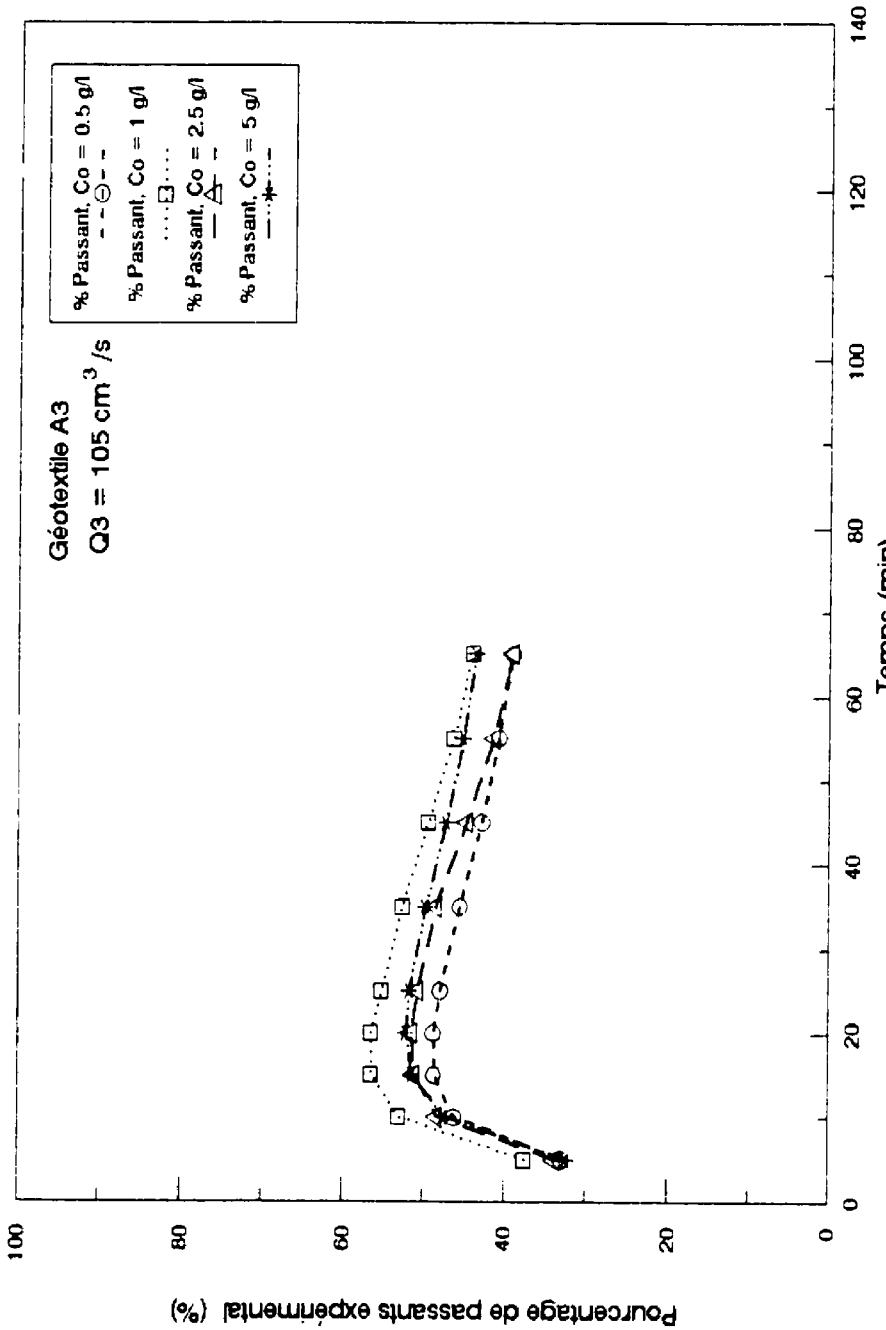


Figure 5.10 influence de la concentration initiale Co sur les passants, géotextile A3, Q3 = 105 cm^3/s

En résumé, nous pouvons dire qu'à des concentrations initiales inférieures à 5 g/l ou plus précisément, comprises entre 0.5 et 2.5 g/l, il n'y a pas d'influence de C_0 sur les pourcentages de passants et par conséquent, sur les efficacités de filtration. Ceci confirme les résultats théoriques obtenus au chapitre 3 où les paramètres P du pourcentage de passants et E_{th} de l'efficacité de filtration théorique, indépendants de C_0, ne dépendent que de la structure des filtres géotextiles et de la granulométrie du sol en suspension à filtrer. Aussi, on rappelle que ces deux paramètres sont établis à partir d'une théorie basée sur une modélisation probabiliste de passage des particules à travers une structure fibreuse; cette approche est basée elle même sur des rapports géométriques entre les dimensions des particules et celles des pores de la structure des filtres géotextiles.

5.2.1.3 Influence du débit d'écoulement sur les passants et les efficacités de filtration

Les figures 5.9 et 5.10 montrent les résultats des pourcentages de passants à travers le géotextile A3 pour des débits d'écoulement égaux respectivement à Q2 = 70 cm^3/s et Q3 = 105 cm^3. La moyenne des efficacités de filtration mesurées à la fin des essais et obtenue à Q2 pour des C_0 variant de 0.5 à 5 g/l, est égale à 54 % (fig. 5.9) tandis qu'elle est de 58 % avec le débit Q3 (fig. 5.10). Ce qui donne une différence relative entre ces valeurs moyennes de 7 %. Plus en détail, cette différence entre E_{mes} à Q2 et à Q3 est égale à 3 % pour C_0 = 0.5 g/l, 3.6 % pour C_0 = 1 g/l, 8 % pour C_0 = 2.5

g/l et 16 % pour les essais à C_0 = 5 g/l.

On remarque que, même en incluant les résultats obtenus à C_0 = 5 g/l, les différences entre E_{mes} à Q2 et à Q3 sont faibles ou même très faibles; ce qui montre que le paramètre de l'efficacité de filtration est indépendant de la vitesse d'écoulement ou du débit d'écoulement. Ceci confirme les résultats obtenus théoriquement dans le chapitre 3 où les paramètres P des passants et E_{th} de l'efficacité de filtration sont indépendants de la vitesse d'écoulement (équations 3.44 et 3.45). Aussi, Gendrin (1991) montre qu'il n'y a pas d'influence de la vitesse d'écoulement sur les passants à travers un géotextile non tissé aiguilleté d'ouverture de filtration O_{95} égale à 126 μm et ceci quelque soit le paramètre géométrique O_{95}/d_{50} (fig. 2.16). Cependant, on rappelle que les résultats de Gendrin sont obtenus dans des conditions expérimentales différentes et où la durée des essais de filtration est très courte (variant de 5 à 6 min).

5.2.1.4 Validation du modèle théorique des passants et de l'efficacité de filtration

La méthode expérimentale que nous avons exposée au chapitre 4 a permis d'une part, de déterminer assez facilement les efficacités de filtration des géotextiles non tissés aiguilletés étudiés et d'autre part, de mettre en évidence l'influence des paramètres de l'ouverture de filtration, de la concentration initiale en particules solides des suspensions et du débit d'écoulement sur le processus de la filtration des suspensions. Cependant,

et à ce stade de l'étude, nous pouvons dire que cette méthode n'est pas exemptée d'incertitudes, particulièrement celles liées à la mesure des concentrations à l'aval des filtres géotextiles comme nous l'avons décrit précédemment. Aussi, il serait intéressant de pouvoir prédire les efficacités de filtration à l'aide d'un modèle théorique. Pour se faire, nous utilisons les paramètres des passants Pa et de l'efficacité de filtration E_{th} (équations 3.44 et 3.45) établis au chapitre 3 à partir de la simulation d'un essai de filtration basée sur les probabilités de passage des particules à travers les géotextiles. Ainsi, pour tous les géotextiles étudiés, les efficacités théoriques E_{th} établies et pésentées dans le tableau 3.5 sont comparées à celles (E_{mes}) obtenues expérimentalement.

Pour les essais à Q1 = 35 cm^3/s, les tableaux 5.2 à 5.4 montrent les résultats obtenus avec les géotextiles A et B à C_0 = 0.5, 5 et 10 g/l. Tous les autres résultats sont présentés dans l'annexe V. On remarque que, d'une façon générale et pour des C_0 < 5 g/l, le modèle théorique de l'efficacité de filtration surestime très légèrement les efficacités. On peut dire que jusqu'à cette limite de concentration, les résultats expérimentaux collent assez bien avec le modèle théorique de E et le décalage observé entre ce dernier et les efficacités mesurées expérimentalement est acceptable. Ce décalage pourrait être dû à la phase transitoire de 12 min qui correspond au remplissage du canal. Durant cette phase, les mesures des concentrations C_a supposées être prises à l'aval du filtre ne sont pas connues et la variation de ces dernières en fonction du temps est supposée linéaire, ce qui a pour effet de surestimer les passants entre t = 0 et t = 12 min et par conséquent, sous estimer les efficacités finales mesurées.

Tableau 5.2 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
E_{mes} (%)	25	36	45	55	29	40 *
E_{th} (%)	28	42	48	58	33	69
ΔE/E (%)	10	14	6	5	12	42

* Essai ayant duré 65 min

Tableau 5.3 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 5 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
E_{mes} (%)	27	41	37	47	29	*
E_{th} (%)	28	42	48	58	33	69
ΔE/E (%)	4	2	23	19	12	-

* Colmatage du géotextile

Tableau 5.4 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 10 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
E_{mes} (%)	14	16	15	22	12	*
E_{th} (%)	28	42	48	58	33	69
ΔE/E (%)	50	62	69	62	63	-

*Colmatage du géotextile

Tous les essais de filtration réalisés avec le géotextile B2 montrent qu'il n'y a aucune comparaison entre les passants théoriques et les passants expérimentaux (tab. 5.2 à 5.3). Ce filtre est caractérisé par une ouverture de filtration FOS et une porosité n plus faibles (FOS = 67 μm et n = 0.89), ce qui lui confère un rapport géométrique FOS/d_{50} égal à 1.6 qui a engendré un colmatage très rapide après seulement 65 min de filtration et même pour des concentrations initiales plus faibles (C_0 = 0.5 g/l, tab. 5.2). On peut dire qu'à cette limite, il y a changement de structure du filtre dû à un colmatage de surface très important lui même causé par la faible probabilité de passage des particules fines à travers la première nappe de fibres du géotextile (cf § 3.4.2.6).

Pour les essais à C_0 = 10 g/l (tab. 5.4) et 20 g/l (annexe V.9), les efficacités théoriques sont sans commune mesure avec les efficacités mesurées. Ce qui est conforme à l'hypothèse de validité du modèle de Pa où celui-ci a été établi pour de faibles concentrations en particules solides. Ceci peut être dû au fait qu'un plus grand nombre de particules arrivant au filtre aura une plus grande probabilité de passage.

Les tableaux 5.2 à 5.4 montrent que jusqu'à 5 g/l et excepté le géotextile B2 (tab. 5.2 et 5.3), les différences relatives sont très acceptables et on peut dire que le modèle de prédiction de l'efficacité de filtration colle assez bien avec les efficacités mesurées. Cependant, à 5 g/l, les géotextiles A3 et A4 présentent des différences relatives entre E_{th} et E_{mes} relativement élevées (respectivement 23 et 19 %, tab. 5.3). Ceci est dû justement au processus d'autofiltration particulièrement marqué dans les géotextiles ayant

des ouvertures de filtration plus faibles (respectivement 125 et 78 μm) et par lesquelles les passants continuent encore à diminuer avant qu'il ne se stabilise. Nous verrons ci-dessous que ces limites de concentration C_0 et d'ouverture de filtration FOS permettent d'observer un critère qui caractérise ce processus d'autofiltration.

Dans la figure 5.11, les variations des efficacités théoriques et expérimentales en fonction de FOS/d_{50} résument tous les résultats obtenus avec le débit d'écoulement Q1 = 35 cm^3/s pour des C_0 variant de 0.5 à 20 g/l. Ces tendances montrent que pour des C_0 inférieures à 5 g/l et un rapport $FOS/d_{50} > 1.8$, du moins compris entre 1.8 et 3.4, le modèle de prédiction de l'efficacité E_{th} colle bien avec les résultats expérimentaux.

En ce qui concerne les essais à débits Q2 et Q3 avec le géotextile A3, les tableaux 5.5 et 5.6 montrent que le modèle de l'efficacité est en assez bon accord avec les efficacités expérimentales. Cependant, il faut remarquer que les essais réalisés avec un débit Q3 = 105 cm3/s donnent des efficacités mesurées relativement surestimées mais ne dépassant pas 20 % de différence relative par rapport à l'efficacité théorique de A3 qui est constante et égale à 48 % (tab. 5.6). Cette différence relative est encore plus faible et est comprise entre 2 et 17 % pour les essais à Q2 = 70 cm3/s (tab. 5.5). Ces résultats confirment que les paramètres théoriques des passants Pa et de l'efficacité de filtration E_{th} sont indépendants de la vitesse d'écoulement (ou du débit d'écoulement).

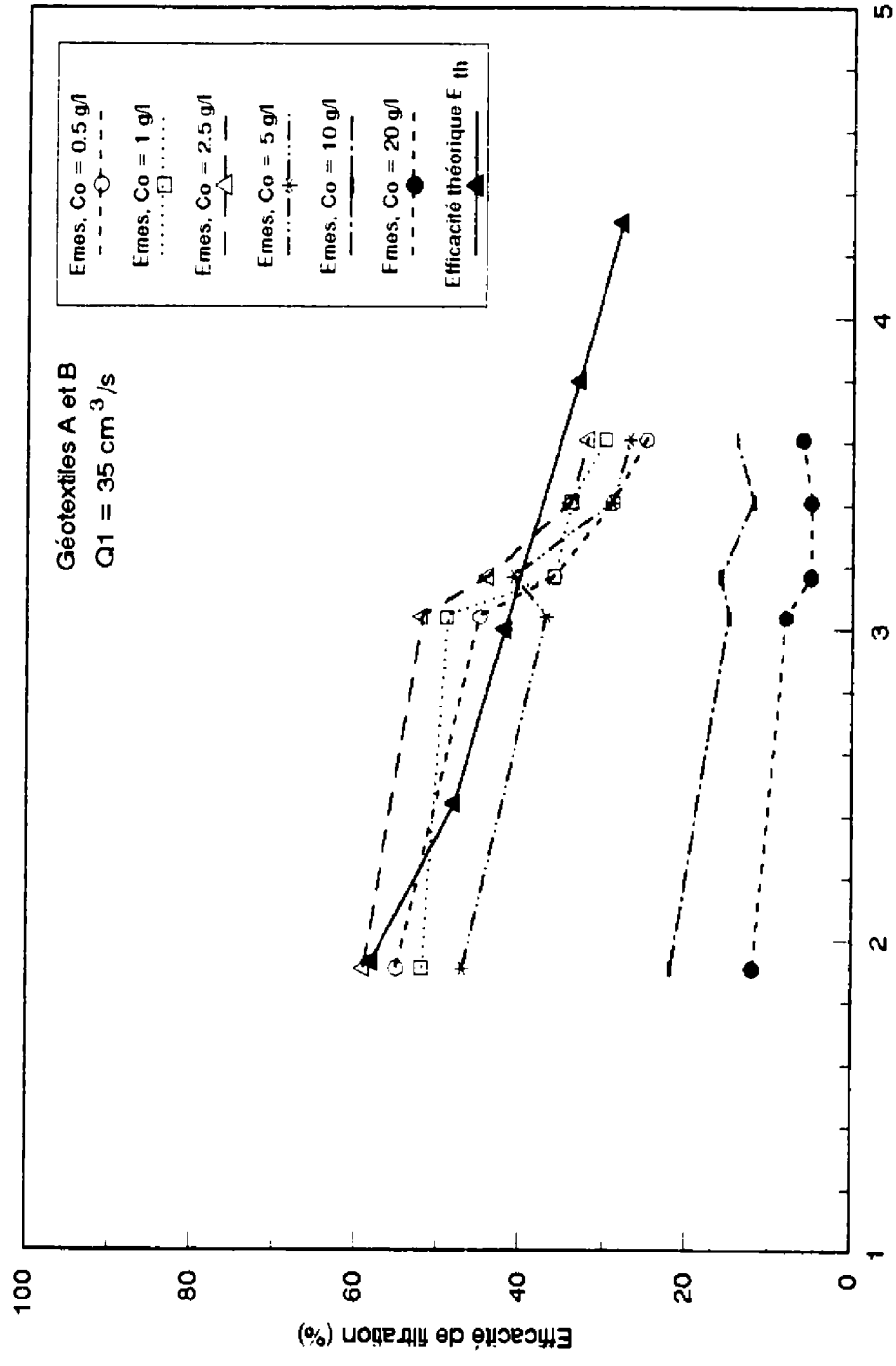


Figure 5.11 Variation de l'efficacité de filtration en fonction de FOS/d_{50} des géotextiles A, Q1 = 35 cm^3/s

Tableau 5.5 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales du géotextile A3, C_0 comprises entre 0.5 et 5 g/l, Q2 = 70 cm³/s

Concentrations initiales C_0	E_{exp} (%)	E_{th} (%)	$\Delta E/E$ (%)
C_0 = 0.5 g/l	58	48	17
C_0 = 1 g/l	54	48	11
C_0 = 2.5 g/l	55	48	13
C_0 = 5 g/l	47	48	2

Tableau 5.6 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales du géotextile A3, C_0 comprises entre 0.5 et 5 g/l, Q3 = 105 cm³/s

Concentrations initiales C_0	E_{exp} (%)	E_{th} (%)	$\Delta E/E$ (%)
C_0 = 0.5 g/l	60	48	20
C_0 = 1 g/l	56	48	14
C_0 = 2.5 g/l	60	48	20
C_0 = 5 g/l	56	48	14

5.2.2 Granulométrie Gr(d) des passants

La simulation de l'essai de filtration de suspensions nous a permis d'établir au chapitre 3 un modèle de prédiction Gr(d) (équations 3.50 et 3.51) des granulométries de sol obtenues à l'aval des filtres géotextiles étudiés. Les granulométries théoriques présentées dans la figure 3.24, sont comparées avec celles obtenues expérimentalement lors des essais de filtration à débit d'écoulement Q1 = 35 cm^3/s. Mais d'abord, une analyse de l'influence des paramètres de l'ouverture de filtration FOS et de la concentration initiale C_0 des suspensions sur les granulométries des passants va nous permettre de mettre en évidence un critère d'autofiltration. Les résultats rapportés dans ces analyses concernent les essais à C_0 = 0.5, 1 et 5 g/l.

5.2.2.1 Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants

Les figures 5.12 à 5.14 montrent les granulométries des passants à travers les géotextiles A. Pour un C_0 plus faible de 0.5 g/l, l'influence de FOS est très marquée (fig. 5.12); en effet, plus l'ouverture de filtration est élevée, plus les granulométries expérimentales sont décalées vers la droite, c'est-à-dire vers des diamètres plus grands. Autrement dit, plus FOS est important plus la probabilité de passage des grosses particules augmentent.

D'une façon générale et au-delà d'un diamètre de particules d'environ 30 μm, on constate que pour C_0 = 1 g/l (fig. 5.13), plus FOS est élevée plus le diamètre des

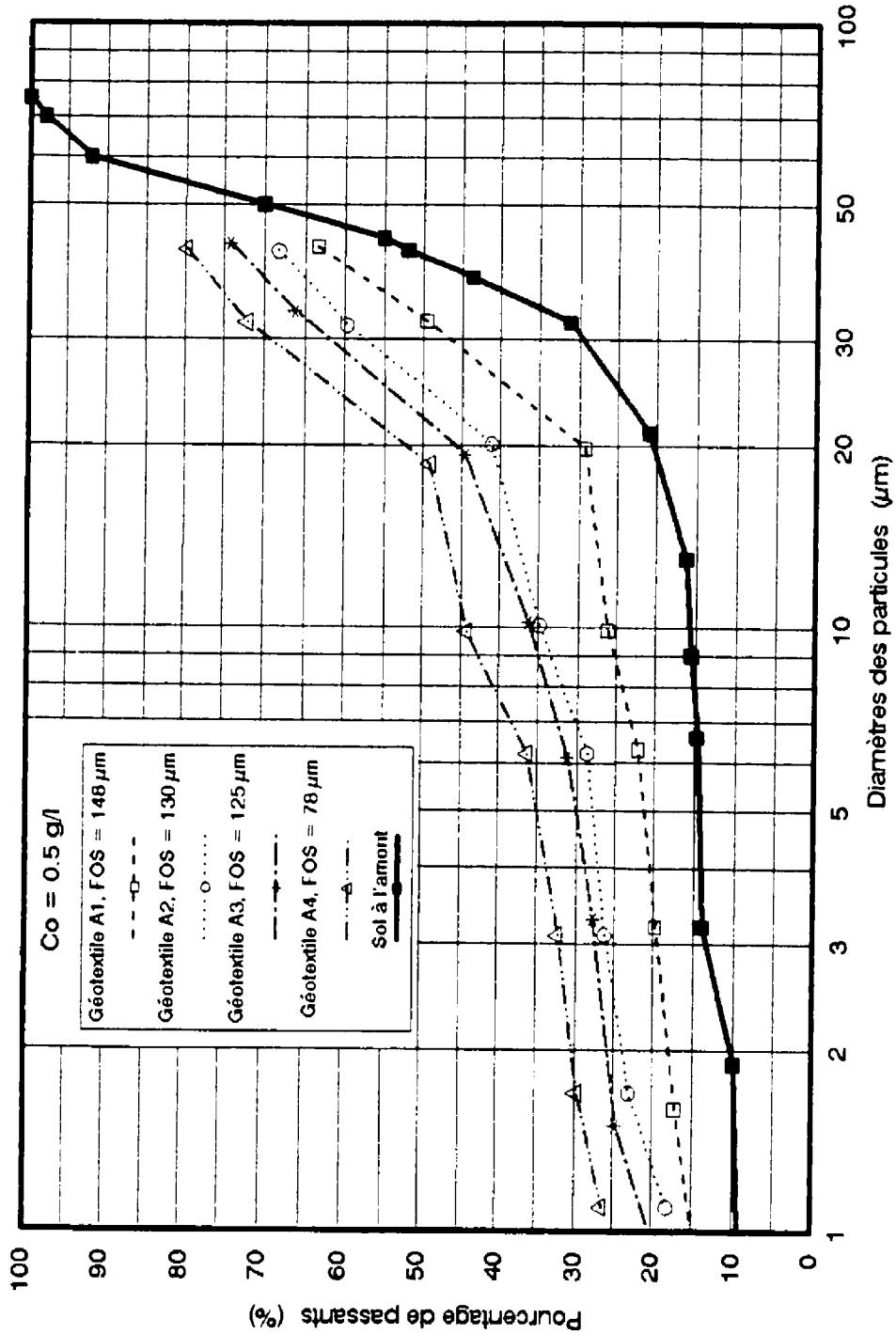


Figure 5.12 Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants, géotextiles A, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

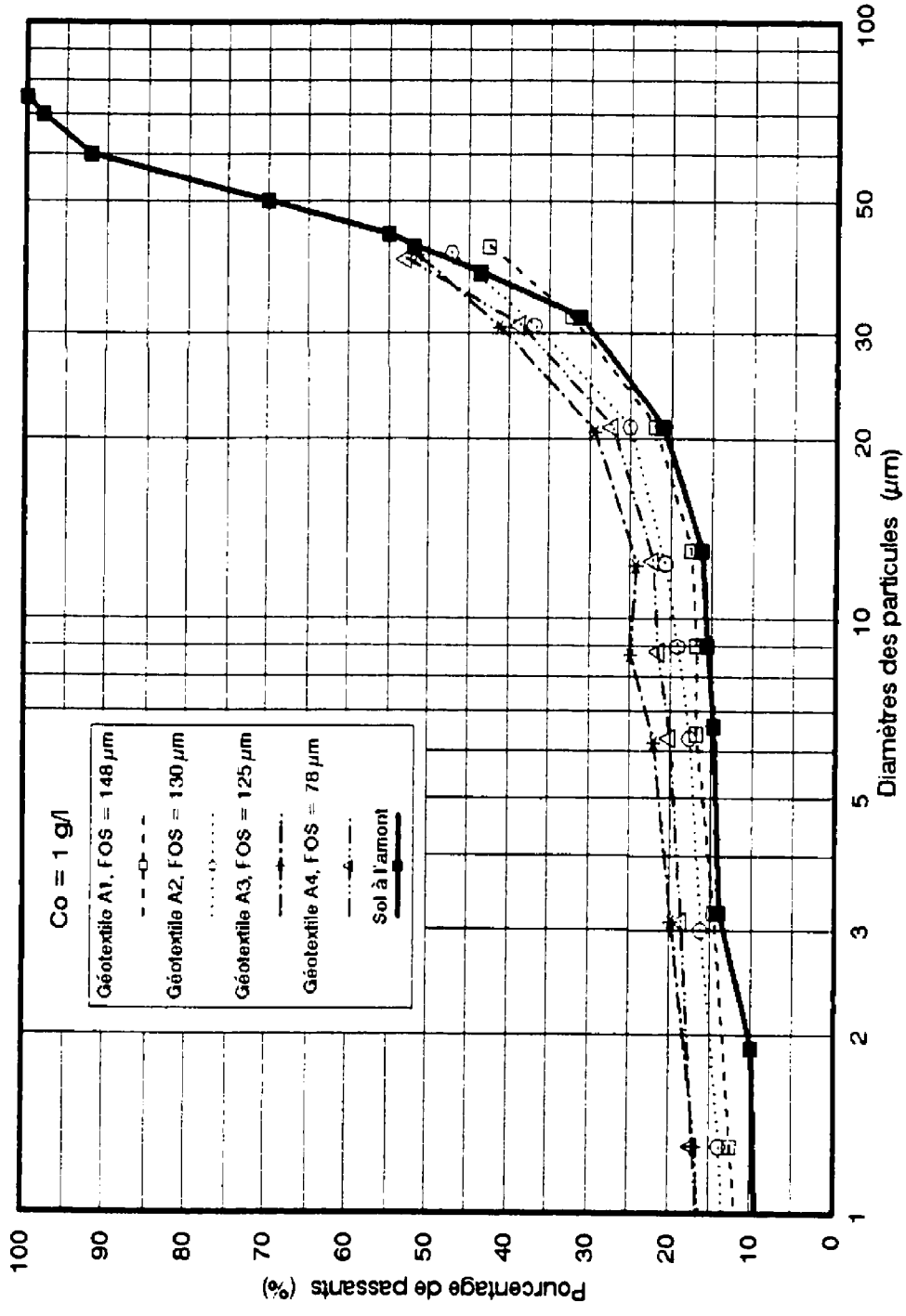


Figure 5.13 Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants, géotextiles A, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm ^{3}/s

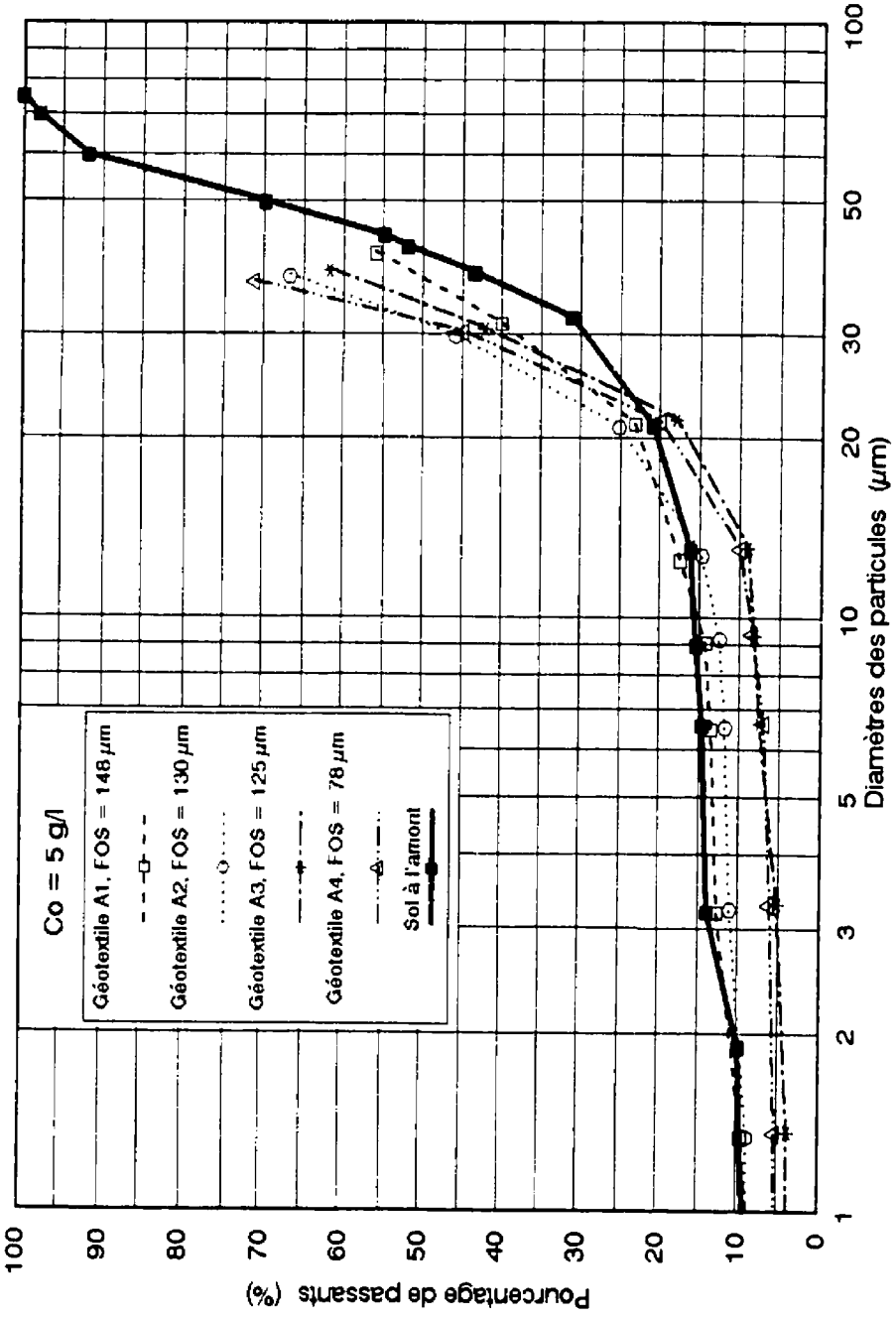


Figure 5.14 Influence de l'ouverture de filtration sur les granulométries des passants, géotextiles A, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm ^{3}/s

particules augmente. L'extrapolation des courbes granulométriques des figures 5.13 et 5.14 montre que d_{50} passe environ de 45 μm pour A2 et même plus de 50 μm pour A1 à 38 μm pour A3 et A4. Cette tendance est très bien visible pour C_0 = 5 g/l (fig. 5.14) où le d_{50} passe de 37 ou 38 μm pour A1 à environ 31 μm pour A4. Aussi, pour un même diamètre d des particules supérieures à 30 μm, le pourcentage de particules inférieures à d est plus élevé pour FOS croissant.

L'analyse en terme de particules fines inférieures à 2 μm montre que plus FOS est petit, plus le pourcentage de particules fines augmente dans les suspensions obtenues à l'aval (fig. 5.12 et 5.13); autrement dit, plus les grosses particules sont retenues à l'amont. Pour la même fraction de sol argileuse, la figure 5.14 montre exactement le phénomène inverse; en effet, plus FOS diminue, plus le pourcentage de fines diminue à l'aval du filtre c'est-à-dire plus les fines sont retenues à l'amont. Aussi, on remarque que l'extrapolation des courbes granulométriques au delà de d = 30 μm, montre que les grosses particules supérieures à 50 μm sont absentes dans les suspensions filtrées et qu'elles sont bien retenues à l'amont particulièrement pour les géotextiles A2, A3 et A4. On peut dire qu'à C_0 = 5 g/l, ou du moins compris entre 2.5 et 5 g/l, le gâteau de sol formé à la surface amont des géotextiles est structuré de telle façon que les grosses particules arrêtent les particules plus fines. On peut donc dire que pour des concentrations C_0 inférieures à 5 g/l, l'influence de l'ouverture de filtration est très marquée sur les granulométries des passants et qu'au-delà de cette limite de C_0, un processus d'autofiltration prend place à la surface des géotextiles; ce dernier est

caractérisé par la rétention des fines particules par les grosses particules. Il est évident que cette situation n'est pas sans engendrer un changement de structure des filtres; ce changement est caractérisé par la formation d'un complexe sol-géotextile et cela justifie la limite fixée de faible concentration en particules solides pour valider la théorie de prédiction des passants et des granulométries du sol établie au chapitre 3.

5.2.2.2 Influence de la concentration initiale sur les granulométries des passants

La comparaison entre les courbes granulométriques des sols passant à travers les géotextiles A avec la granulométrie du sol utilisé dans les suspensions à l'amont des filtres permet de mettre complètement en évidence l'influence de C_0 sur la formation d'une couche autofiltrante à la surface des géotextiles et ceci en fonction de leur ouverture de filtration. Ce qui permet d'établir un critère d'autofiltration des suspensions par les géotextiles non tissés aiguilletés.

En effet, les figures 5.13 et 5.14 montrent que, pour les géotextiles A1 et A2 (FOS = 148 et 130 μm), les pourcentages de particules fines obtenus à l'aval de ces filtres diminuent très peu, passant d'environ 14 % (fraction < 2 μm) pour C_0 = 1 g/l (fig. 5.13) à moins de 10 % pour C_0 = 5 g/l (fig. 5.14). En ce qui concerne les géotextiles A3 et A4 (FOS = 125 et 78 μm), les pourcentages de particules < 2 μm passent environ de 18 % pour C_0 = 1 g/l à environ 5 % pour C_0 = 5 g/l. Pour les particules < 10 μm, ces pourcentages passent de 24 à 8 %. Pour ces mêmes filtres, l'extrapolation

des courbes granulométriques montre dans le cas de C_0 = 5 g/l (fig. 5.14), que les d_{max} obtenus à l'aval sont de l'ordre de 45 μm; autrement dit, toute la fraction de sol dont le diamètre est supérieur à 45 μm est retenue par les filtres géotextiles A3 et A4.

Aussi, les figures 5.15 et 5.16 montrent respectivement l'influence de C_0 sur les granulométries des passants des géotextiles A1 et A3. On remarque pour le géotextile A1 que l'influence de C_0 n'est pas très marquée pour les granulométries obtenues à C_0 égales à 0.5 et 1 g/l (fig. 5.15) tandis que la granulométrie obtenue avec A3 sous C_0 = 5 g/l (fig. 5.16) montre une nette diminution des particules fines par rapport à la fraction initiale de la suspension (granulométrie en trait plein).

En conclusion, on peut dire qu'en général pour des concentrations initiales des suspensions inférieures à 5 g/l, il n'y a pas d'influence de C_0 sur les granulométries des passants. Aussi, à cette limite de concentration et à des ouvertures de filtration FOS $\leq$ 125 μm (géotextile A3), il y a bien un processus d'autofiltration qui est installé. Ainsi, en terme de critère géométrique, le d_{50} du sol utilisé est égal à 41 μm et pour FOS $\leq$ 125 μm, le rapport FOS/d_{50} doit être inférieur à 3. Nous mettons donc en évidence l'établissement d'un critère d'autofiltration pour les géotextiles non tissés aiguilletés en filtration des suspensions. Ce critère dépend de l'ouverture de filtration FOS et de la concentration initiale en particules solides C_0:

Pour C_0 = 5 g/l, FOS/d_{50} $\leq$ 3

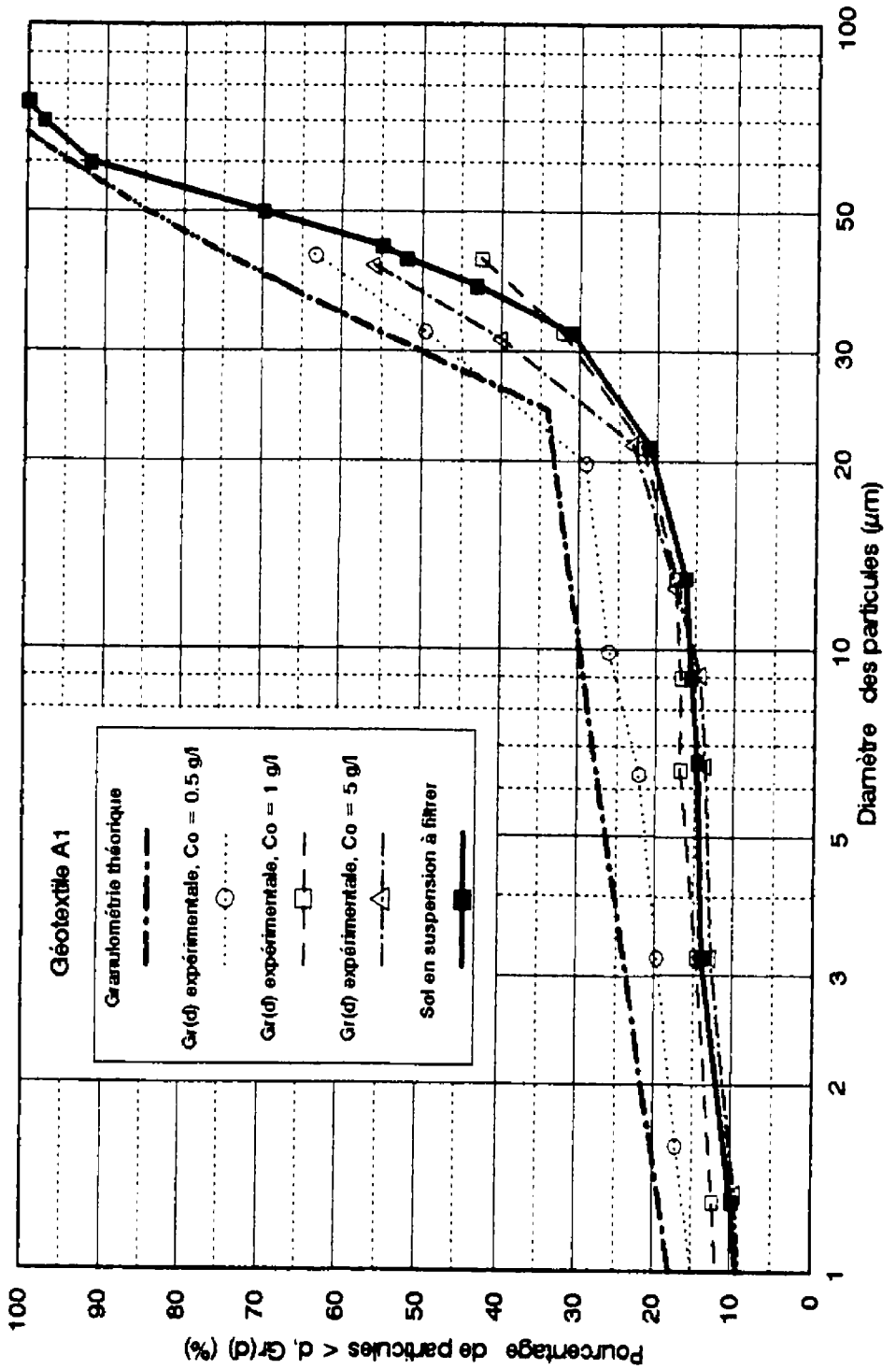


Figure 5.15 Comparaison entre les granulométries théoriques et expérimentales, géotextile A1, Q1 = 35 cm^3/s

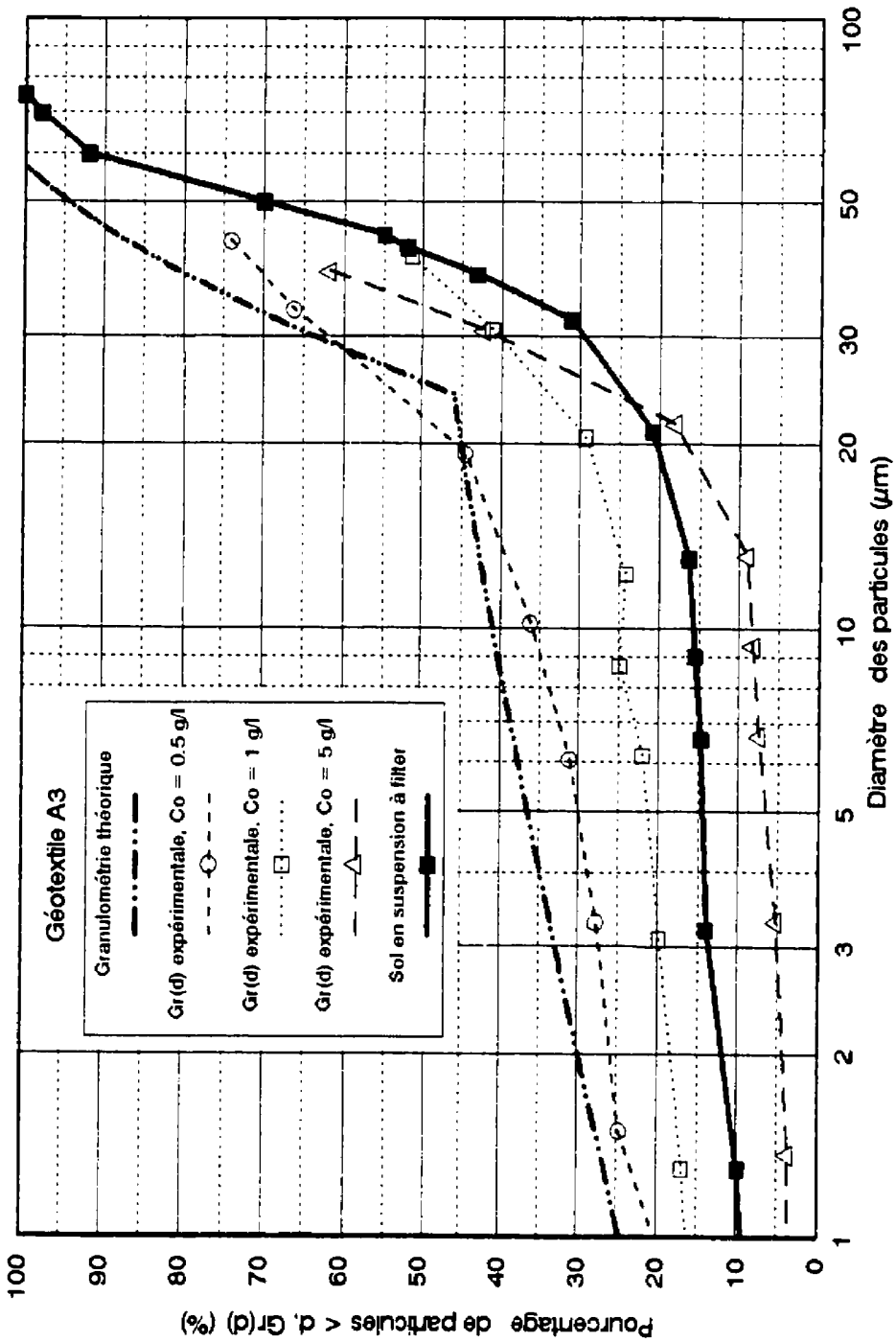


Figure 5.16 Comparaison entre les granulométries théoriques et expérimentales, géotextile A3, Q1 = 35 cm^3/s

5.2.2.3 Validation du modèle théorique de la granulométrie Gr(d) des passants

Nous avons montré ci-dessus que les granulométries des passants dépendent de l'ouverture de filtration et pour la filtration des suspensions concentrées à moins de 5 g/l, il n'y a pas d'influence de la concentration initiale. Ceci confirme les résultats théoriques établis au paragraphe 3.4.2.5. Les figures 5.15 et 5.16 montrent les granulométries théoriques et expérimentales des géotextiles A1 et A3. On remarque qu'il y a un léger décalage entre les granulométries obtenues à C_0 = 0.5 et 1 g/l surtout pour les fines particules inférieures à 20 μm. Ceci est aussi observé pour les géotextiles A2 et A4 (annexe VI). Ce décalage peut être dû à l'opération d'échantillonnage du sol filtré après les essais de filtration. En effet, les échantillons de sol retenus pour les essais granulométriques par sédimentométrie n'ont pas été testés avec leur fraction exacte de sol fin étant donné qu'une quantité de ces fractions reste en suspension et que sa récupération nécessite une mise à l'étuve du volume de suspension filtré. Cette opération s'est évidemment avérée impossible à réaliser vu les volumes de suspensions importants mis en jeu.

Pour les essais réalisés à C_0 = 5 g/l, les figures 5.15 et 5.16 montrent que les granulométries théoriques sont sans commune mesure avec celles obtenues expérimentalement. Ceci confirme la limite de validité en terme de concentrations initiales en particules solides des suspensions à filtrer, de la simulation théorique permettant de prédire les passants. Enfin, on peut dire qu'en général et dans le cas de

la filtration des suspensions concentrées à moins de 5 g/l, le modèle de prédiction de Gr(d) colle assez bien avec les granulométries expérimentales.

5.2.3 Degrés de colmatage des géotextiles étudiés

Après avoir étudié l'influence de l'ouverture de filtration FOS, de la concentration initiale C_0 des suspensions et du débit d'écoulement sur le processus de filtration en termes de pourcentages de passants et d'efficacité de filtration ainsi qu'en terme de granulométries des passants, nous complétons cette recherche par une étude sur le phénomène du colmatage des géotextiles non tissés étudiés en filtration de suspensions.

On a vu dans le chapitre 3 que le degré de colmatage interne théorique $\Delta n/n$ dépend particulièrement de la concentration initiale C_0 en particules solides des suspensions (ou de la quantité de sol filtrée) et qu'au-delà de 2.5 g/l, $\Delta n/n$ est très élevé et dépassant 100 % de variation relative de la porosité (tab. 3.11). En ce qui concerne la rétention de surface c'est-à-dire les particules de sol retenues par la première nappe à la surface du géotextile, nous avons établi que le pourcentage de rétention R_s est très élevé par rapport à la rétention de chaque nappe à l'intérieur du filtre (fig. 3.26). La fraction de sol la plus élevée retenue à la surface est celle du géotextile B2 à cause de sa très faible ouverture de filtration (FOS = 67 μm).

Nous avons essayé d'évaluer expérimentalement ces deux types de colmatage selon la

méthodologie de mesure décrite dans le chapitre 4 (§ 4.7). La rétention de surface ou colmatage de surface est évaluée en terme d'épaisseur T_c de la couche de sol qui s'accumule à la surface du géotextile. Cette épaisseur est mesurée après chaque essai de filtration à partir de la mesure de l'épaisseur T_{gc} (équation 4.11) du système sol-géotextile obtenu. Cette opération de mesures comporte beaucoup d'incertitudes compte tenu d'une part, du remaniement lors de la récupération des échantillons engendrant donc une perte de sol (intérieure et de surface) et d'autre part, des erreurs de lectures au comparateur (de l'ordre de 7 à 10 %). En ce qui concerne le degré de colmatage interne, il est estimé en terme de variations relatives de la porosité n selon la relation 4.12. On rappelle que ce dernier calcul est basé sur une supposition de la porosité n_c (égale à 0.5) du gâteau de sol formé à la surface des filtres géotextiles. Toutes les mesures des épaisseurs T_{gc} et les calculs intermédiaires pour estimer T_c et $\Delta n/n$ sont présentés dans les tableaux de l'annexe VII. Nous ne rapportons pour analyse dans le tableau 5.7 que les résultats concernant T_c et $\Delta n/n$ des sections intermédiares N° 2 de chaque échantillon. L'analyse de l'influence de l'ouverture de filtration FOS et de la concentration C_0 sur le colmatage des géotextiles étudiés associée aux obervations microscopiques de certains géotextiles permet de discuter les résultats théoriques établis dans le chapitre 3.

5.2.3.1 Influence de l'ouverture de filtration sur le degré de colmatage des géotextiles étudiés

Le tableau 5.7 présente les valeurs de T_c et de $\Delta n/n$ mesurés sur les sections médianes des géotextiles récupérés après les essais de filtration à diférentes C_0. Les tableaux de l'annexe VII montrent que les épaisseurs T_{gc} mesurées des systèmes sol-géotextile dans les trois sections 1, 2 et 3 ne sont pas uniformes avec des valeurs un peu plus élevées à la base du géotextile avec le canal (sections 1); ceci peut être dû à la sédimentation des particules de sol à la fin de l'essai de filtration. On remarque dans le tableau 5.7 que pour un C_0 donné, plus l'ouverture FOS est petite plus T_c est élevée et plus le gâteau de sol à la surface des géotextiles est important. Pour les géotextiles A et pour $C_0 \leq 2.5$ g/l, les épaisseurs T_c des gâteaux sont en général multipliées par 3 quand l'ouverture de filtration FOS est divisée environ par 2 (de 148 μm pour A1 à 78 μm pour A4). Ceci confirme la tendance de variation du pourcentage de rétention théorique R_t à la surface qui est plus élevé (tab. 3.10) pour des ouvertures théoriques plus petites. Les épaisseurs T_c mesurées du gâteau des géotextiles A restent tout de même assez faibles par rapport aux épaisseurs respectives T_g initiales. C'est ce qui explique les faibles augmentations des pertes de charge observées lors des essais avec des FOS décroissant.

Pour les essais à C_0 = 5 g/l, les épaisseurs T_c du gâteau de sol à la surface sont relativement très élevées variant de 0.7 à 1.35 mm mais l'influence de FOS sur le gâteau n'est pas très marquée; ce qui justifie et confirme qu'un autre processus

Tableau 5.7 Degrés de colmatage interne $\Delta n/n$ et de surface T_c des géotextiles étudiés, Q1 = 35 cm^3/s

Géotextiles \ C_0(g/l)		0.5	1	2.5	5	10	20
A1	T_g (mm)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
	T_c (mm)	0.08	0.11	0.21	0.96	0.31	0.53
	$\Delta n/n$ (%)	5.57	6.43	7.08	5.9	31	34.61
A2	T_g (mm)	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
	T_c (mm)	0.12	0.89	0.24	0.97	0.46	0.76
	$\Delta n/n$ (%)	6.07	6.27	7.81	5.2	33.21	35.02
A3	T_g (mm)	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	T_c (mm)	0.19	0.26	0.29	0.7	0.56	0.88
	$\Delta n/n$ (%)	6.67	7.21	9.49	14	29.78	35.02
A4	T_g (mm)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
	T_c(mm)	0.21	0.31	0.95	1.35	0.63	0.93
	$\Delta n/n$ (%)	7.94	8.27	8.7	9	34.17	36.22
B1	T_g (mm)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
	T_c (mm)	0.10	0.54	0.25	0.68	0.41	0.53
	$\Delta n/n$ (%)	6.31	8.25	8.33	9.2	36.96	38.61
B2	T_g (mm)	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	T_c (mm)	0.06	0.15	0.19	-	2.03	2.71
	$\Delta n/n$ (%)	41	32.21	36.25	12.4	4.37	7.97

caractérisé par l'autofiltration des particules de sol est installé.

Pour des $C_0 \geq$ 10 g/l, l'ouverture de filtration est nettement marquée mais avec des épaisseurs T_c du gâteau pas très élevées relativement aux concentrations très élevées. Ceci peut être dû au fait qu'un plus grand de particules de sol arrivant individuellement au filtre peut entrainer les particules déjà arrêtées et que la structure de surface est encore disponible pour qu'elle influence le processus de rétention.

En ce qui concerne les géotextiles B, les mêmes remarques peuvent être avancées sauf le géotextile B2 où le gâteau formé à la surface reste très élevé par rapport aux durées des essais de filtration avec ce matériau. En effet, dans le meilleur des cas l'essai à C_0 = 0.5 g/l a duré 65 min, et dans tous les autres cas les essais n'ont pas dépassé 20 à 25 min. À cause de son ouverture de filtration relativement très faible (= 67 μm), un colmatage très rapide caractérisé par des pertes de charges trés élevées, est observé avec ce géotextile.

Pour le colmatage interne, le tableau 5.7 montre que quelque soit C_0, les variations de $\Delta n/n$ avec FOS croissant ne sont pas très significatives devant celles observées pour les épaisseurs T_c. Toutes proportions gardées, ceci confirme la tendance observée théoriquement (tab. 3.10) où les degrés de colmatage interne théoriques ne sont pas très influencés par la réduction des ouvertures théoriques C_{95}. Aussi, comme les mesures de $\Delta n/n$ dépendent de la quantité de sol piégée à l'intérieur des géotextiles, les faibles

valeurs mesurées particulièrement pour des $C_0 \leq 5$ g/l, peuvent être dues aux erreurs de mesures sur les épaisseurs et le remaniement des échantillons.

5.2.3.2 Influence de la concentration initiale C_0 sur le degré de colmatage des géotextiles étudiés

Pour un même géotextile, le tableau 5.7 montre que l'augmentation de la concentration initiale C_0 engendre en général une légère augmentation de l'épaisseur T_c du gâteau pour des $C_0 \leq 2.5$ g/l. À C_0 égale à 5 g/l, le gâteau à la surface est 4 à 10 fois plus grand que pour de faibles C_0. Pour A1 par exemple, T_c varie de 0.08 pour $C_0 = 0.5$ g/l à 0.96 mm pour $C_0 = 5$ g/l. Le même ordre de grandeur est observé pour les autres géotextiles. Ce qui confirme donc la formation d'une couche autofiltrante à la surface des géotextiles testés à $C_0 = 5$ g/l. Ceci est très visible quand on compare les visualisations microscopiques de la figure 5.17a avec celles des figures 5.18a et 5.19a. Elles montrent la couche de sol formant le gâteau à la surface des géotextiles A3 et A2 qui ont des ouvertures de filtration très proches (respectivement 125 et 130 μm). On observe que la couche de sol formée à $C_0 = 0.5$ g/l (fig. 5.17a) est beaucoup moins épaisse que celles observées à $C_0 = 5$ g/l (fig. 5.18a et 5.19a). Ceci confirme la validité du critère d'autofiltration établi lors de l'analyse des granulométries des passants où on a montré qu'un $FOS/d_{50} \leq 3$ avec des concentrations initiales $C_0 = 5$ g/l engendre la formation d'une couche de sol autofiltrante à la surface des géotextiles non tissés aiguilletés étudiés.

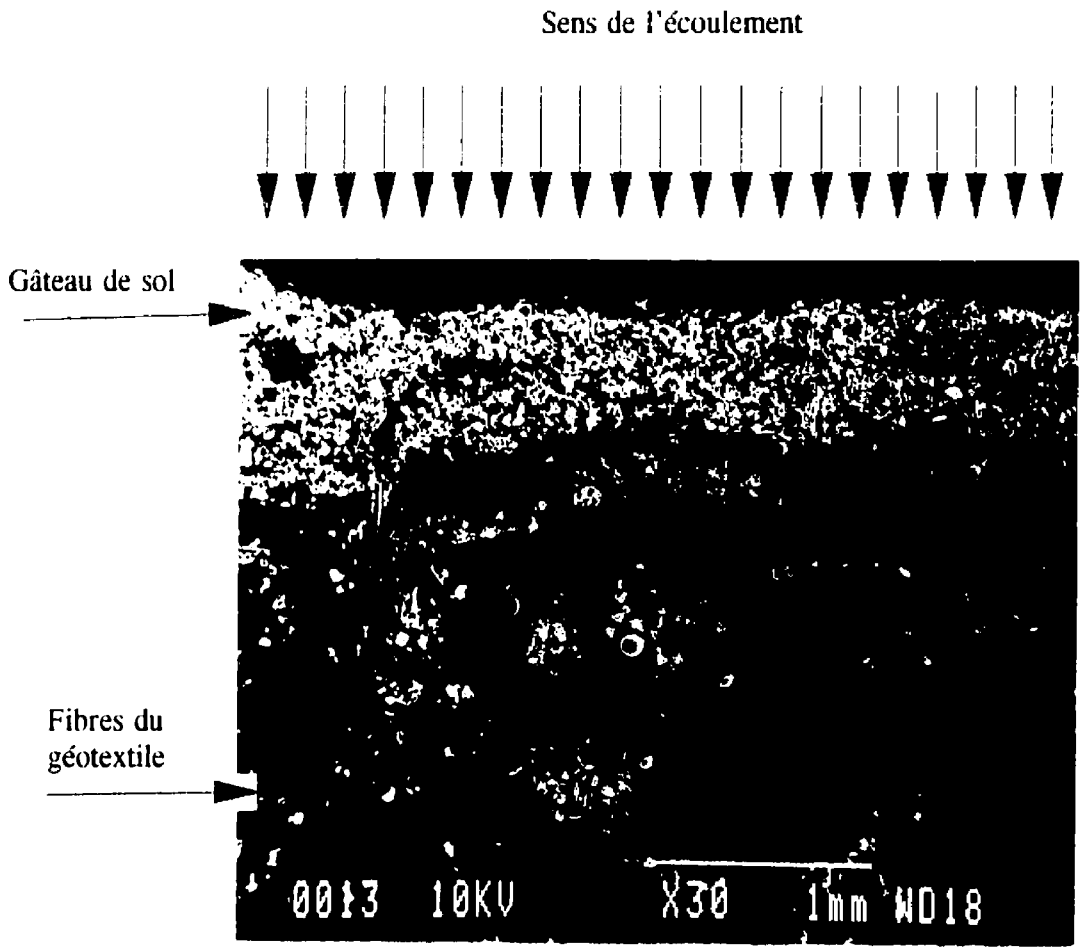


Figure 5.17a Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, gâteau de sol en surface, C_0 = 0.5 g/l

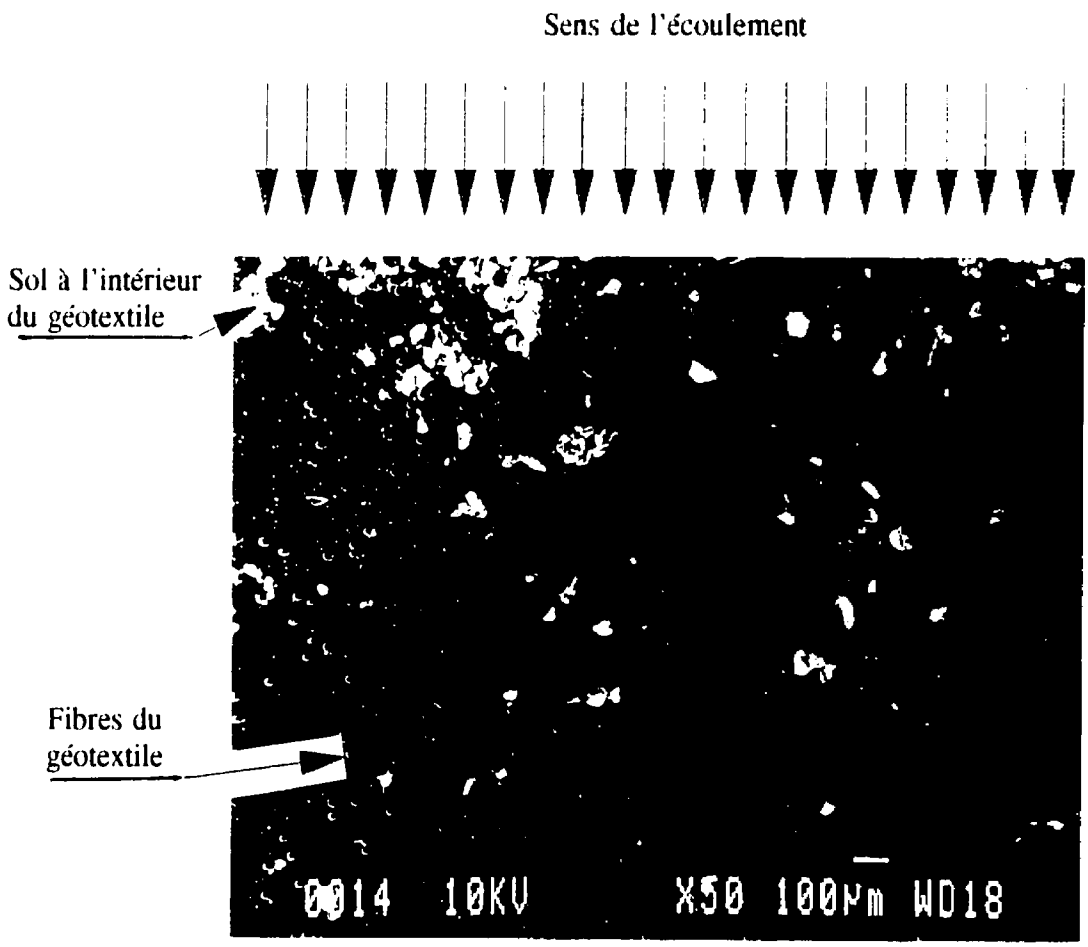


Figure 5.17b Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, colmatage interne, C_0 = 0.5 g/l

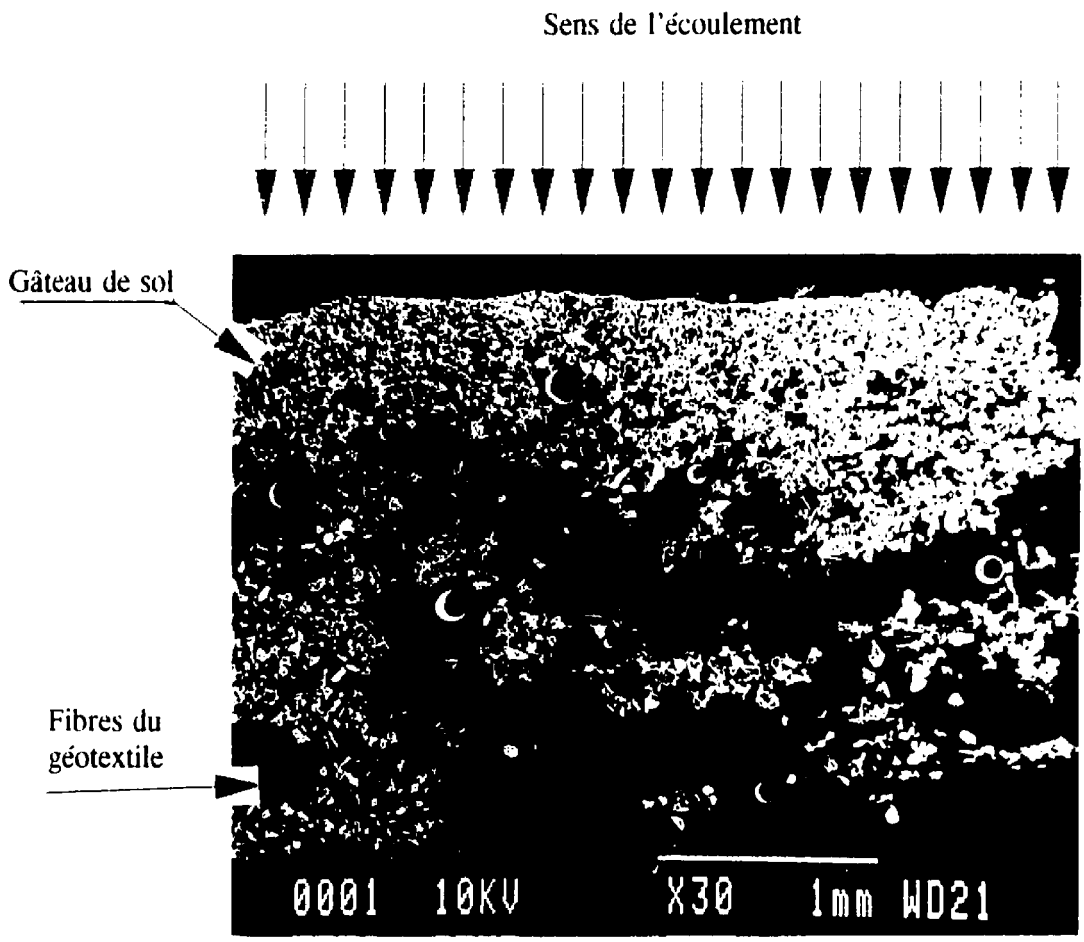


Figure 5.18a Visualisation microscopique transversale du géotextile A2, gâteau de sol en surface, C_0 = 5 g/l

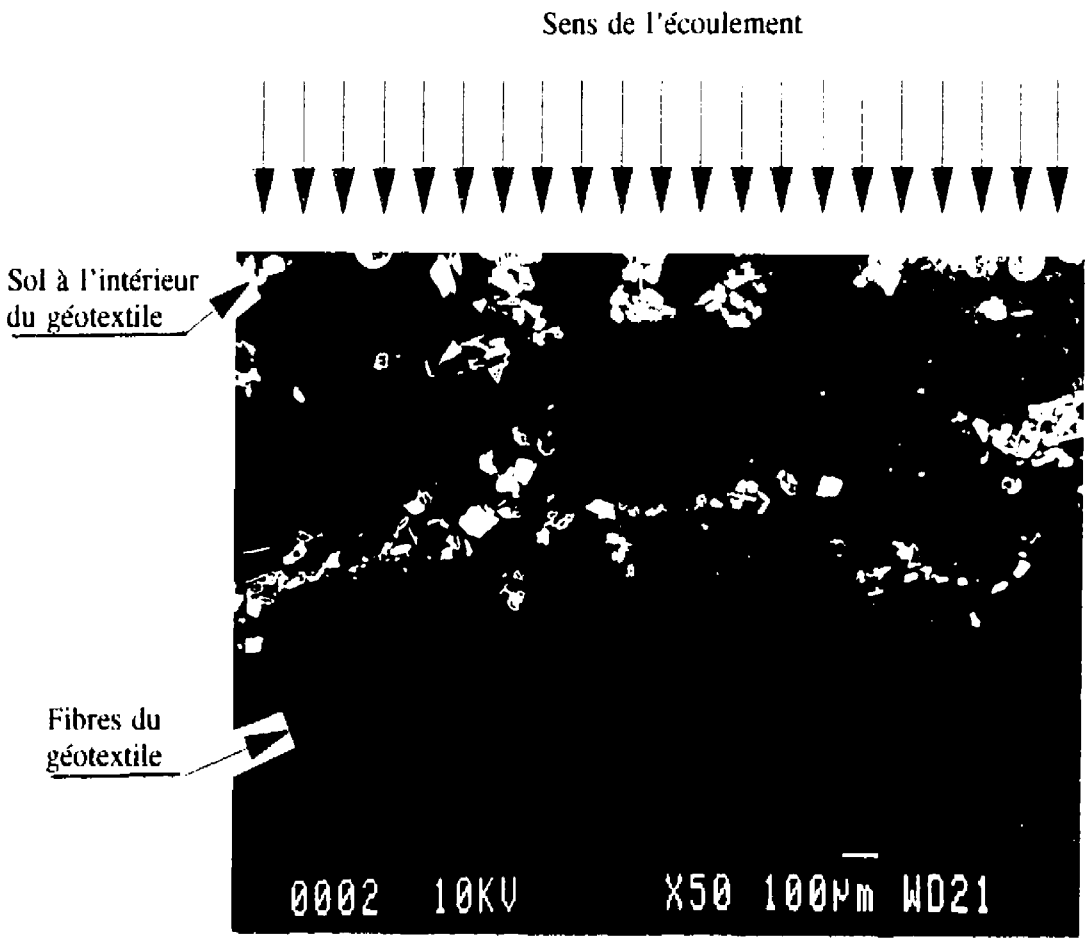


Figure 5.18b Visualisation microscopique transversale du géotextile A2, colmatage interne, C_0 = 5 g/l

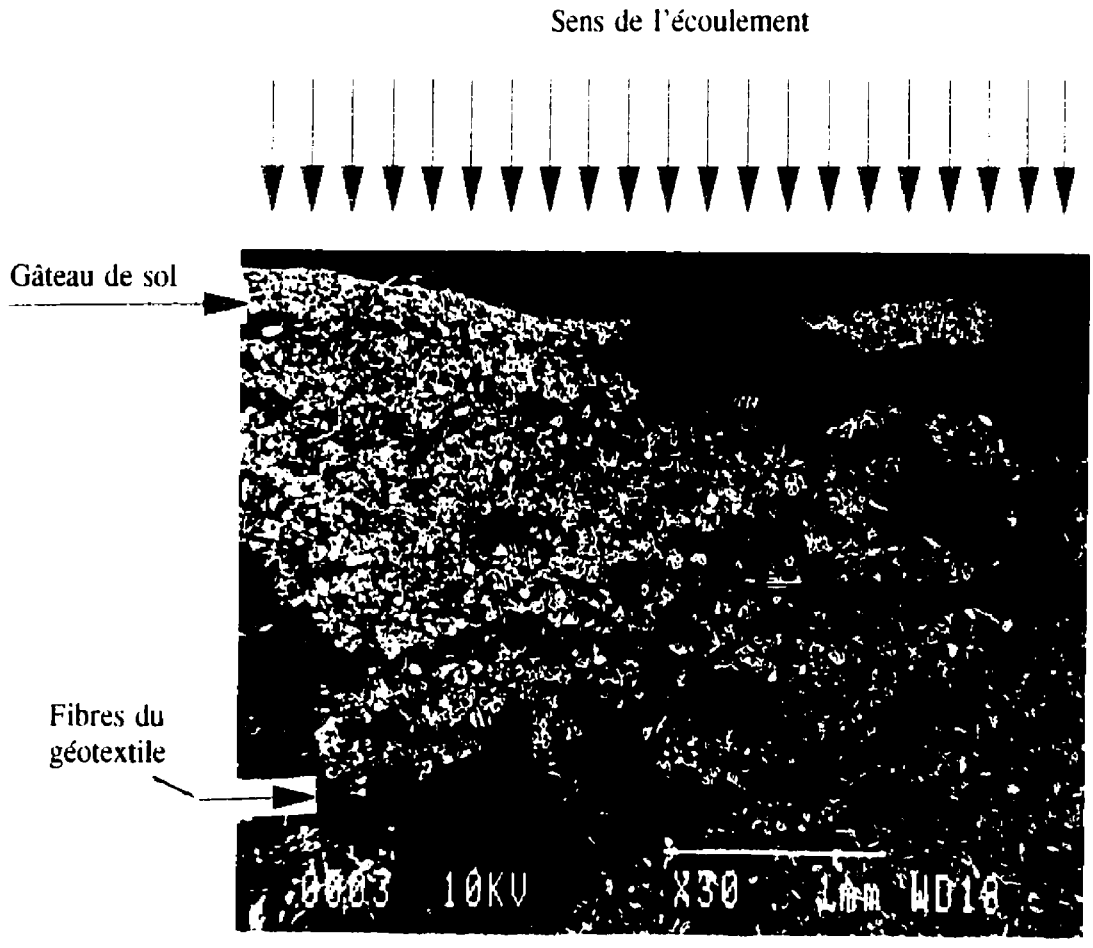


Figure 5.19a Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, gâteau de sol en surface, C_0 = 5 g/l

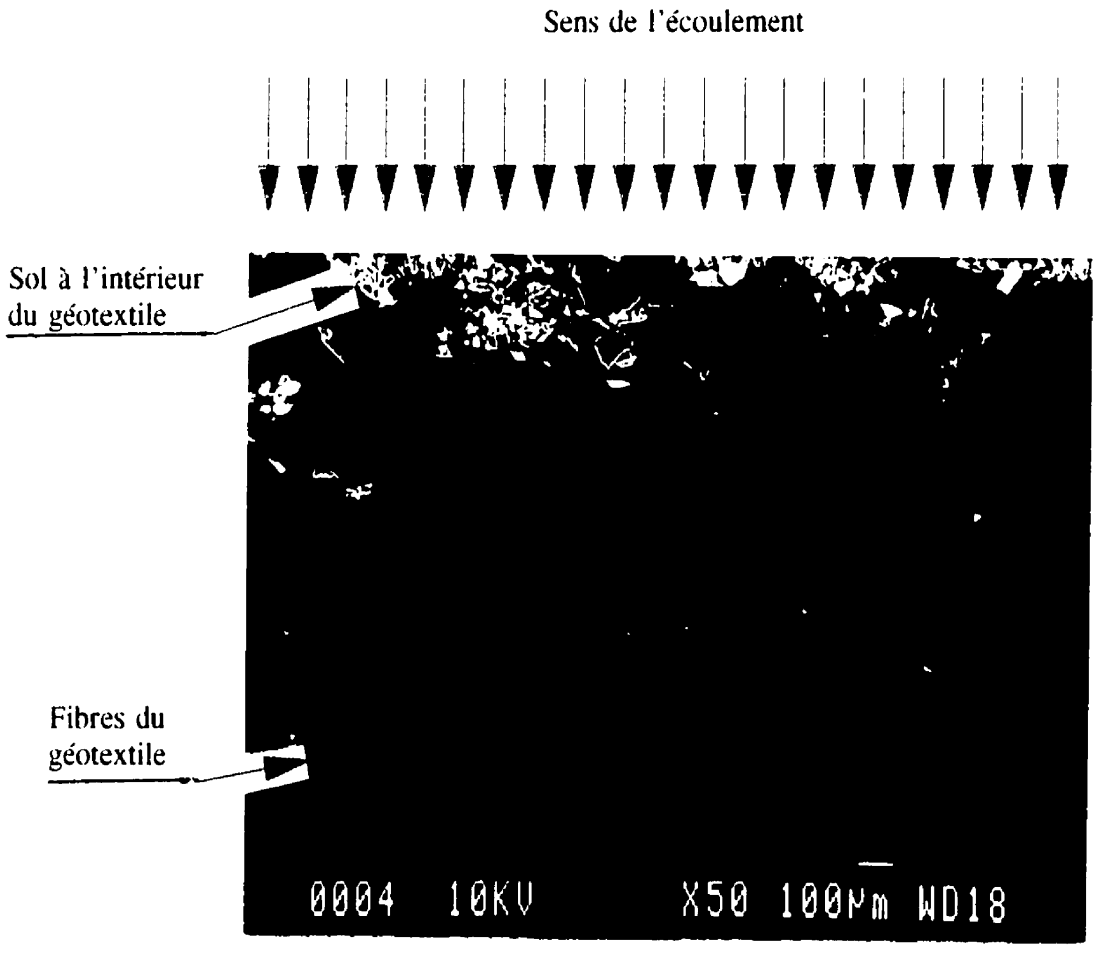


Figure 5.19b Visualisation microscopique transversale du géotextile A3, colmatage interne, C_0 = 5 g/l

En terme de degré de colmatage interne, le tableau 5.7 montre pour les géotextiles A, des valeurs très faibles de $\Delta n/n$ dépassant rarement 10 % avec en général une légère augmentation pour des C_0 croissant. Les observations microscopiques faites à l'intérieur des géotextiles A3 et A2 (fig. 5.17b, 5.18b et 5.19b) font observer que le volume intérieur de ces filtres imbibé de sol parait faible. Ce qui justifie dans les conditions expérimentales réalisées, les faibles valeurs de $\Delta n/n$ mesurés. Une nette augmentation cependant est observée dans les essais à des C_0 égales à 10 et 20 g/l.

En ce qui concerne le géotextile B2, nous avons vu que dans tous les essais réalisés avec ce matériau, il y a colmatage (surtout de surface) à cause de sa faible ouverture de filtration FOS (= 67 μm). Cependant, les valeurs du degré de colmatage interne $\Delta n/n$ (tab. 5.7) relativement plus élevées pour des $C_0 \leq 2.5$ g/l et relativement plus faibles pour des $C_0 \geq 5$ g/l restent inexpliquées. Néanmoins, on peut penser que les valeurs élevées peuvent être dues au fait que le géotextile B2 ayant la plus forte densité (ρ_s = 124.86 kg/m^3, tab. 3.4) et la plus faible porosité (0.891) a bien conservé la quantité de sol piégé (et obtenue seulement après 20 à 65 min d'essai) à l'intérieur de sa structure lors des opérations de pesées des échantillons. Pour les faibles valeurs de $\Delta n/n$, elles peuvent être dues au fait que les essais avec B2 à $C_0 \geq 5$ g/l n'ont duré que quelques minutes (pour cause de colmatage) et que la quantité de sol retenue à l'intérieur est faible.

5.2.3.3 Validation du modèle théorique du degré de colmatage interne

Le tableau 5.8 présente les degrés de colmatage interne théoriques et expérimentaux après essais de filtration des géotextiles étudiés. Les valeurs théoriques présentées pour différentes C_0 sont calculées sur la base d'une durée d'essais de 132 min et pour fin de comparaison, nous ne présentons les degrés de colmatage mesurés que pour les essais à $C_0 \leq 5$ g/l et ayant duré 132 min. Aussi, les degrés de colmatage interne théoriques sont calculés selon le modèle de l'équation 3.56 avec des sections offertes à l'écoulement tenant compte de la section du géotextile sollicitée par la filtration après la perte de charge finale. Autrement dit, ce n'est plus la section moyenne de 310 cm^2 qui est considérée mais la section initiale de 230 cm^2 plus (+) la section due à la perte de charge ΔH mesurée à la fin des essais (annexe II).

On signale d'abord qu'il n'y a pas de comparaison à faire entre les degrés de colmatage interne pour les C_0 comprises entre 2.5 et 5 g/l pour cause de processus d'autofiltration dont les modèles théoriques utilisés n'en tiennent pas compte. Le tableau 5.8 montre dans tous les cas que les $(\Delta n/n)_{th}$ théoriques sont très élevés par rapport à ceux mesurés et ceci dans des proportions très grandes; ce rapport de différence varie de 3 à 12 selon C_0 (0.5 et 1 g/l). Ceci était prévisible compte tenu de la procédure de mesure de $\Delta n/n$ qui n'est pas fiable à cause d'une part, de la fragilité de récupération et de préparation à sec des échantillons sol-géotextile (perte de sol très importante par remaniement) et d'autre part, de l'erreur sur les mesures des épaisseurs des échantillons récupérés.

Tableau 5.8 Degrés de colmatage interne théoriques $(\Delta n/n)_{th}$ et expérimentaux $(\Delta n/n)_{exp}$ des géotextiles étudiés (en %)

Géotextiles \ C_0 (g/l)		0.5	1	2.5	5
A1	$(\Delta n/n)_{th}$ (%)	38	72	190	284
	$(\Delta n/n)_{exp}$ (%)	5.6	6.4	7	6
A2	$(\Delta n/n)_{th}$ (%)	37	53	193	347
	$(\Delta n/n)_{exp}$ (%)	6	-	8	5
A3	$(\Delta n/n)_{th}$ (%)	27	58	140	252
	$(\Delta n/n)_{exp}$ (%)	6.7	7	9.5	14
A4	$(\Delta n/n)_{th}$ (%)	29	53	101	193
	$(\Delta n/n)_{exp}$ (%)	8	8.3	8.7	9
B1	$(\Delta n/n)_{th}$ (%)	39	58	188	253
	$(\Delta n/n)_{exp}$ (%)	6.3	-	8.3	-
B2	$(\Delta n/n)_{th}$ (%)	26	51	125	194
	$(\Delta n/n)_{exp}$ (%)	-	-	-	-

Mais la tendance de variation de $\Delta n/n$ théorique et expérimental reste très intéressante. En effet, pour une même concentration initiale C_0 (tab. 5.8), l'ouverture de filtration n'influence pas le degré de colmatage interne. Théoriquement et pour un même C_0, le degré de colmatage interne est presque constant quand l'ouverture C_{95} varie de 79 μm (géotextile A4) à 177 μm (A1). Toutes proportions gardées, ceci est justifié par la même tendance de variation de $(\Delta n/n)_{exp}$ expérimental; en effet et pour un même C_0, quand l'ouverture de filtration FOS varie de 78 μm (A4) à 148 μm (A1), les degrés de colmatage mesurés sont presque les mêmes. Ceci confirme le fait que l'ouverture de filtration a une influence sur la rétention des particules à la surface des géotextiles (cas du géotextile B2) où les probabilités de passage sont plus faibles et les fractions de sol retenues sont relativement plus importantes (par rapport aux autres nappes indépendantes, fig. 3.26).

Quant à l'influence de C_0 sur le modèle théorique du degré de colmatage interne, la tendance de variation de $\Delta n/n$ est en général confirmée dans le tableau 5.8. En effet, plus C_0 est élevé plus le degré de colmatage interne est important; autrement dit plus la quantité de sol à filtrer est importante, plus le volume des vides (pores) à l'intérieur du géotextile diminue et plus le filtre se colmate.

En conclusion, nous pouvons dire que l'étude que nous avons réalisée sur le colmatage des géotextiles non tissés étudiés en filtration de suspensions reste encore incomplète et

difficile à cause surtout du manque de moyens et de méthodes expérimentales non encore disponibles pour la mesure des degrés de colmatage physique. Ce colmatage physique est caractérisé par un changement de structure (variation relative de la porosité) dû au piégeage des particules de sol à l'intérieur (comme en surface) des géotextiles qu'on ne peut mesurer, du moins pour le moment, d'une façon satisfaisante. C'est la raison pour laquelle toutes les études antérieures sur ce phénomène ont été faites en terme d'analyse expérimentale des variations de pertes de charge à travers les géotextiles en filtration de suspension ou encore en terme de réduction des paramètres hydrauliques comme la perméabilité.

Néanmoins, les résultats expérimentaux obtenus associés à la théorie développée dans ce cadre ont permis surtout de mettre en évidence le rôle des paramètres de l'ouverture de filtration et de la concentration initiale en particules solides des suspensions. En effet, dans la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés aiguilletés, deux types de colmatage peuvent être observés selon les valeurs de l'ouverture de filtration FOS et de la concentration C_0. Plus FOS est petit, plus la rétention se fait à la surface à cause des faibles probabilités de passages des particules et plus le gâteau de sol formé est important. Pour des $C_0 \leq 5$ g/l, c'est le colmatage de surface qui est dominant en atteignant une limite observée à 5 g/l et caractérisée par l'installation d'un processus d'autofiltration. En ce qui concerne le colmatage interne, il dépend beaucoup plus de la concentration initiale C_0 de la suspension à filtrer que de l'ouverture de filtration et que le degré de ce colmatage est théoriquement plus important que C_0 est élevé.

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

Compte tenu du fait que les géotextiles non tissés sont de plus en plus utilisés dans les applications environnementales impliquant la rétention des particules en suspension, la problématique définie par notre programme de recherche consiste en l'étude des performances de filtration des suspensions par les géotextiles non tissés aiguilletés. Ces performances sont évaluées à partir de deux paramètres de base: l'efficacité de filtration et le degré de colmatage.

La méthodologie appliquée consiste en une étude théorique sur la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés; elle est suivie d'une partie expérimentale réalisée en vue de vérifier les concepts établis théoriquement. La théorie utilisée est basée sur la simulation de l'essai de filtration de suspensions permettant la prédiction des paramètres de l'efficacité E, de la granulométrie Gr(d) des sols passant à travers les géotextiles étudiés et du degré de colmatage interne $\Delta n/n$ de ces derniers.

Les résultats obtenus à partir du programme de recherche que nous avons réalisé dans ce cadre permettent de formuler les conclusions suivantes:

6.1.1 Les géotextiles utilisés

Les géotextiles utilisés dans notre programme de recherche sont des non tissés aiguilletés caractérisés par des porosités (n) très élevées et supérieures à 90 %; ce qui confirme le choix de ces matériaux pour les fonctions de filtration. L'analyse des caractéristiques physiques des géotextiles étudiés (porosité, masse surfacique μ_s, épaisseur T_s, diamètre des fibres d_f et ouverture de filtration FOS) qui interviennent dans la description des modèles théoriques est conforme à celle établie dans la littérature. Les ouvertures de filtration mesurées au tamisage hydrodynamique permettent d'argumenter en faveur de ce mode opératoire et les valeurs obtenues montrent en général, une excellente reproductibilité des résultats; elles sont comprises entre 67 et 148 μm et diminuent avec l'augmentation de la masse surfacique μ_s. La considération structurale des géotextiles non tissés aiguilletés basée sur un empilement de nappes élémentaires d'épaisseur $2d_f$ introduite dans le modèle de structure de Faure (1988) permet la prédiction de l'ouverture de filtration théorique C_{95} qui est en très bon accord avec les ouvertures de filtration FOS mesurées.

6.1.2 La modélisation théorique

La simulation théorique de la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés aiguilletés étudiés est basée sur une approche phénoménologique utilisant les probabilités de passage des particules à travers une structure fibreuse. Cette approche théorique

appliquée nécessite la caractérisation de la structure des géotextiles étudiés, ce qui a permis de développer des modèles de prédiction de l'efficacité de filtration (ou du pourcentage de passants), de la granulométrie des passants et du degré de colmatage pour la filtration des suspensions à faibles concentrations initiales en particules solides ne dépassant pas 5 g/l, ou du moins une limite comprise entre 2.5 et 5 g/l.

Les modèles de prédiction de l'efficacité E et de la granulométrie Gr(d) ne dépendent que de la structure des géotextiles et de la granulométrie du sol en suspension, tandis que celui du degré de colmatage interne montre qu'il dépend de la concentration initiale des suspensions et des éléments de structure du géotextile.

Le programme de simulation théorique basé sur un empilement de nappes élémentaires des géotextiles non tissés a permis de déterminer le pourcentage de particules retenues au niveau de chaque nappe et les résultats obtenus montrent que la première nappe du filtre (surface du géotextile) retient la plus grande fraction (R_s) de sol par rapport aux fractions respectives de chaque nappe intérieure (R_i). Ce qui montre aussi que plus l'ouverture théorique C_{95} est faible, plus la rétention de surface est importante.

6.1.3 L'expérimentation

Les essais de filtration de suspensions réalisés dans le cadre du programme expérimental arrêté permettent d'analyser le comportement des géotextiles non tissés aiguilletés étudiés

en terme d'efficacité de filtration et de colmatage. Ce comportement a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres de l'ouverture de filtration FOS et de la concentration initiale C_0:

- Si le pourcentage de passant cumulé ne permet pas de renseigner complètement sur le processus de filtration durant l'essai, sa variation en fonction du temps montre qu'un processus d'autofiltration est plus ou moins marqué selon les valeurs de FOS et de C_o.

- Les efficacités de filtration mesurées à différentes concentrations C_0 et à différents débits d'écoulement Q montrent qu'il y a très peu ou pas d'influence de C_0 et de Q sur les efficacités, ce qui est conforme au modèle de prédiction de E.

- Jusqu'à 5 g/l, les efficacités de filtration mesurées dépendent de l'ouverture de filtration FOS; en effet, plus FOS est faible, plus les efficacités de filtration sont élevées.

- Pour des C_0 compris entre 2.5 et 5 g/l, l'analyse des granulométries des sols passant à travers les géotextiles étudiés a permis de confirmer l'installation d'un processus d'autofiltration qui dépend de l'ouverture de filtration FOS des filtres. En effet, ce processus est particulièrement prononcé pour des FOS $\leq$ 125 μm, ce qui permet de dire qu'un rapport géométrique du type $FOS/d_{50} \leq 3$ peut être considéré comme un critère d'autofiltration des suspensions concentrées à moins de 5 g/l.

- La mesure des degrés de colmatage réalisée dans les conditions expérimentales utilisées a montré que les deux aspects du colmatage peuvent être observés et ceci selon les valeurs de l'ouverture de filtration et de la concentration initiale en particules solides:

a- Le colmatage interne dépend beaucoup plus de la concentration C_0 que de l'ouverture de filtration et son degré est d'autant plus élevé, pour un même géotextile, que C_0 est élevé.

b- Jusqu'à 5 g/l, c'est le colmatage de surface qui est le plus dominant et en terme d'épaisseurs T_c du gâteau, son degré dépend de l'ouverture de filtration. Plus FOS est faible, plus la rétention des particules se fait à la surface et plus T_c est élevée; ce qui justifie l'établissement d'un processus d'autofiltration pour C_0 compris entre 2.5 et 5 g/l.

6.1.4 Validation de la théorie utilisée

- Pour des C_0 inférieures à 5 g/l, le modèle théorique de E surestime légèrement les efficacités de filtration mais en général, il est en bon accord avec les efficacités mesurées dans l'intervalle de FOS/d_{50} compris entre 2 et 4 (ou $0.25 < d_{50}/FOS < 0.5$).

- Les granulométries mesurées du sol passant à travers les géotextiles non tissés après essais de filtration sont en bon accord avec celles déterminées par le modèle de prédiction de Gr(d).

- Enfin, le modèle théorique permettant la prédiction du colmatage interne n'a pu être vérifié à cause de la procédure de mesure qui comporte beaucoup d'erreurs dues au remaniement des échantillons du système sol-géotextile récupéré après les essais de filtration. Ce qui n'a pas empêché de montrer que la tendance des variations des degrés de colmatage en fonction des paramètres de l'ouverture de filtration et de la concentration initiale en particules solides est conforme à celle obtenue théoriquement.

6.2 Recommandations

L'étude que nous avons entreprise dans le domaine très complexe de la filtration des suspensions de sol par les géotextiles non tissés constitue une initiative pour le moins, très encourageante. Si les résultats obtenus permettent de répondre positivement à la question de l'utilisation des géotextiles dans ce type de fonctions du moins dans les conditions établies dans le mémoire, il n'en reste pas moins à élucider certains résultats tout-à-fait inattendus:

- Le critère d'autofiltration établi dans le cas de la filtration des suspensions à $C_0 \leq 5$ g/l mérite d'être vérifié pour des rapports géométriques FOS/d_{50} plus petits, avec des sols silteux en suspension de d_{50} plus élevé (> 41 μm).

- L'étude préliminaire sur la notion de colmatage des géotextiles non tissés a permis d'en identifier deux types pouvant se produire selon les concentrations en particules solides

à filtrer; la mise au point d'une méthode de mesures plus fiable appuyée d'une étude à l'analyseur d'images constituerait un thème de recherche très important.

- Nous suggérons qu'une étude plus poussée sur la filtration des suspensions par les géotextiles non tissés basée sur l'approche hydrodynamique mais tenant compte de la distribution des pores de ces matériaux permettrait de confronter les résultats avec ceux obtenus par l'approche phénoménologique basée sur les probabilités de passage des particules en suspension.

- En ce qui concerne l'expérimentation, une conception d'un banc d'essai hydraulique permettant de réaliser des écoulements permanents dès le début de la filtration pourrait être envisagée comme modèle réduit afin de tester des géotextiles ayant des sections plus larges et de filtrer des quantités importantes de suspensions. Aussi, l'utilisation d'appareillages plus précis comme des équipements à faisceaux lumineux pour la mesure des concentrations ou le comptage des particules solides ferait améliorer les conditions expérimentales.

BIBLIOGRAPHIE

- **AKERS, R.J., WARD, A.S.(1977),** "Liquid Filtration Theory and Filtration Pretreatment", Filtration and Practices Part I, Clyde Orr, Editors: Albright, A.L., Maddox, R.N. et McKetta, J.J., Vol.10, pp. 169 - 250.

- **ALLEN Jr., T., DITSWORTH, R.L. (1972),** "Fluid Mechanics", Mc Graw Hill, 415 pages.

- **ASTM (1991),** "Standard Test Method for Determining Filtering Efficiency and Flow Rate of a Geotextile for Silt Fence Application Using Site-Specific Soil", ASTM, Designation: D5141 - 91, pp. 90 - 93.

- **ATMATZIDIS, D.K., FITZPATRICK, J.A., FORNEK, .T. (1982),** "Evaluation of Geotextiles as Liquid Filter", Proceedings of the 2nd International Conference On Geotextiles, Las Vegas, USA, pp. 73 - 78.

- **BEAUMONT, M., CLOUTIER, S., PÉLOQUIN, E. (1989),** "Sédimentation de nos rivières et réservoirs au Québec", Rapport interne, Département de Génie civil, Section Hydraulique, École Polytechnique de Montréal, 43 pages.

- **BENJAMIN, J.R., CORNELL, C.A. (1970),** "Probability, Statistics and Decision

for Civil Engineers", McGraw-Hill Publishing Company, 684 pages.

- **CALHOUN, C. (1972),** "Development of Design Criteria of Acceptance Specifications for Plastic Filter Cloths", Technical Report F-72-7, U.S.Army Engineers Waterways Experiment Station, Viksburg, Mississipi.

- **CALONIER, M., SOTTON, M., LAGET, B. (1990),** "A Contribution to the Modelisation of Porometry of Fibrous Structures", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 263 - 267.

- **CANCELLI, A., MONTI, R., RIMOLDI, P. (1990),** "Comparative Study of Geosynthetics for Erosion Control", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 403 - 408.

- **CAZZUFFI, D., FAURE, Y., FAYOUX, D. (1984),** "Détermination des caractéristiques de filtration des géotextiles, Comparaison des résultats de différents laboratoires", International Water Power and Dam Construction Conference "Materials for Dams 84", Compte rendu de conférence, Monte-Carlo, Monaco.

- **CEDERGREN, H.R. (1989),** "Seepage, Drainage and Flow Nets", 3rd Ed., New York, NY, John Wiley and Soons, 465 pages.

- **CHEN, C.Y. (1955),** "Filtration of Aerosols by Fibrous Media", Chem. Rev., 55, p. 595.

- **CHEN, Y.H., SIMONS, D.B., DEMERY, P.M. (1981),** "Hydraulic Testing of Plastic Filter Fabrics", Journal of Irrigation and Drainage Division, Proceedings ASCE, Vol.107, N° IR3, pp. 307 - 324.

- **DAVIES, C.N. (1952),** "The Separation of Airborne Dust and Particles", Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering, 113 (5), p. 185.

- **DAVIES, C.N. et PEETZ, V. (1956),** "Impingement of Particles on a Tranverse Cylinder", Proceeding Royal Socity A., Vol.234, p. 269.

- **DAVIES, C.N. (1973),** "Air Filtration" Academic Press, London and New York, 171 pages.

- **DHATT, G., TOUZOT, G. (1981),** "Une présentation de la méthode des éléments finis", Les Presses de l'Université Laval, Québec, Maloine S.A. Éditeur Paris, 543 pages.

- **DEMMAK, A. (1982),** "Contribution à l'étude de l'érosion et du transport solides en Algérie septentrionale", Thèse de Docteur Ingénieur, Université Pierre et

Marie-Curie, Paris, 323 pages.

- **DORMAN, R.G. (1964),** "Theory of Fibrous Filtration", High Efficiency Air Filtration, P.A.F. White and S.E. Smiths ed., Butterworth, London, pp. 67 - 99.

- **DORMAN, R.G. (1966),** "Filtration", Aerosol Science, Edited by C.N. Davies, Academic Press, London and New York, pp. 195 - 222.

- **EL-AMIR, A. (1991),** "Séparation et filtration des sols cohérents par géotextiles", Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourrier, Grenoble, 296 pages.

- **FAURE, Y. (1988),** "Approche structurale de comportement filtrant-drainant des géotextiles", Thèse de Doctorat Es-Sciences, Institut de Recherche Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique (IRIGM), Grenoble, 392 pages.

- **FAURE, Y., GENDRIN, P. (1990),** "Drainage and Geotextile Filter Function in Disturbed Soils", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed.), Balkema, Rotterdam, p. 365.

- **FAYOUX, D. (1977),** "Filtration hydrodynamique des sols par les textiles", Comptes rendus du Colloque International sur l'Emploi des Textiles en Géotechnique, Paris, 2, pp. 329 - 332.

- **FAYOUX, D., EVON, E. (1982),** "Influence de la fibrométrie sur les caractéristiques de filtration des géotextiles non tissés aiguilletés", Comptes rendus de la 2ème Conference Internationale sur les Géotextiles, Las Vegas, USA, pp. 49 - 53.

- **FISHER, G.R., CHRISTOPHER, B.R., HOLTZ, R.D. (1990),** "Filter Criteria Based on Pore Size Distribution", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 289 - 294.

- **GENDRIN, P. (1991),** "Porométrie des géotextiles et applications à la filtration de milieux granulaires, Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourrier, Grenoble, 247 pages.

- **GIROUD, J.P. (1982),** "Filter Criteria for Geotextiles", Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Vol. 1, Las Vegas, pp. 103 - 108.

- **GOURC, J.P. (1982),** "Quelques aspects du comportement des géotextiles en Mécanique des Sols ", Thèse de Doctorat Es-Sciences, Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique (IRIGM), Grenoble, 249 pages.

- **GOURC, J.P., FAURE, Y., ROLLIN, A.L., LAFLEUR, J. (1982),** "Structual Permeability Laws of Geotextiles", 2nd International Conference on Géotextiles,

Las Vegas, Vol.1, pp. 149 - 154.

- **HALIBURTON, T.A., WOOD, P.D. (1982),** "Evaluation of the US Army Corps of Engineer Gradient Ratio test for geotextile performance", 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Vol. I, pp. 97 - 102.

- **HAPPEL, J. (1959),** "Viscous Flow Relative to Array of Cylinders", A.I.Ch.E Journal, Vol.5, N° 2, pp. 174 - 177.

- **HAPPEL, J., BRENNER, H. (1965),** "Low Reynolds Number Hydrodynamics", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 553 pages.

- **HEERTEN, G. (1982),** "Dimensioning the Filtration Properties of Geotextiles Considering Long-term Conditions" 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, USA, Vol.I, pp. 115 - 120.

- **HOOGENDOORN, A.D., VAN DER MEULEN, T. (1977),** "Preliminary Investigations on Clogging of Fabrics", International Conference on the Use of Fabrics on Geotechnics, April 20 - 22, Paris, pp. 1 - 6.

- **HOUI, D., LENORMAND, R. (1986),** "Experimental and Theoretical Study of Particle Accumulation at the Surface of a Filter", 4e World Filtration Congress,

Ostend, Belgique, April, pp. 1.1 - 1.6.

- **HUSSAIN, H. (1981),** "La perméabilité des géotextiles", Thèse de Docteur Ingénieur, Institut de Recherches Interdisciplinaires de Mécanique de Grenoble, 314 pages.

- **KOERNER, R.M., KO, F.K. (1982),** "Laboratory Studies on Long Term Drainage Capability of Geotextiles", Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Vol. I, pp. 91 - 96.

- **KUWABARA, S. (1959),** "The Forces Experienced By Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres In Viscous Flow At Small Reynolds Numbers", Journal Physical Soc., Japan, 14 (4), pp. 527 - 532

- **LAFLEUR, J. (1984),** "Filter Testing Of Broadly Graded Cohesionless Tills", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, N° 4, pp. 634 - 643.

- **LAFLEUR, J., WENDLING, G., TÉTRAULT, M. (1986),** "Filtration Of Broadly Graded Soil By Woven Geotextiles", 3rd International Conference on Geotextiles, Vienne, Austria, Vol. II, pp. 657 - 662.

- **LAFLEUR, J., MLYNAREK, J., ROLLIN, A.L. (1989),** "Filtration Of Broadly

Graded Cohesionless Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, N° 12, pp. 1747 - 1768.

- **LAFLEUR, J., MLYNAREK, J., ROLLIN, A.L. (1992),** "Filter Criteria For Well Graded Cohesionless Soils", Proceedings Geofilters '92, 1st International Conference on Filters and Filtration Phenomenon in Geotechnical and Hydraulic Engineering, Karlsruhe, Germany, pp. 97 - 106.

- **LAMB, H. (1932),** "Hydrodynamics", 6th ed. Cambridge University, London, 313 pages.

- **LAWSON, C. (1986),** Geotextile Filter Criteria For Tropical Residual Soils", 3rd International Conference on Geotextiles, Vienne, Austria, Vol. II, pp. 557 - 662.

- **LOMBARD, G. (1985),** "Analyse et comportement hydraulique des géotextiles thermoliés et thermosoudés", Thèse de Ph.D., Ecole Polytechnique de Montréal, 271 pages.

- **LOMBARD, G., ROLLIN, A.L. (1987),** "Filtration Behavior Analysis of Thin Heat Bounded Geotextiles", Conference Proceedings, Geosynthetics' 87, New Orleans, Vol.2, pp. 482 - 492.

- **LOMBARD, G., ROLLIN, A.L. WOLFF, C. (1986),** "Analysis of Hydraulic Behaviour of Thin Heat Bonded Geotextiles: Structure and Flow Models", 3rd International Conference on Geotextiles, Vienne, Austria, Vol.II, pp. 615 - 620.

- **LOUDIÈRE, D., FAYOUX, D. (1982),** "Filtration et drainage au moyen de géotextiles - essais et spécifications", Comptes rendus de la 2ème Conference Internationale sur les Géotextiles, Las Vegas, Vol. I, pp. 61 - 66.

- **MATHERON, G. (1971),** "Les polyèdres poissoniens isotropes", Cahier interne du Centre de Morphologie Mathématique, Fontainebleau, 137 pages.

- **MICHON, X. (1954),** "Étude du tassement et de la consolisation des boues", 3ème Journées de l'Hydraulique, Alger, pp. 257 - 269.

- **MIGNIOT, C. (1968),** "Étude des propriétés physiques des différents sédiments très fins et leur comportement sous des actions hydrodynamiques", La Houille Blanche, N° 5, pp. 591 - 621.

- **MILLOT, F. (1986),** "Etude de la porométrie des géotextiles et applications", Thèse de Docteur Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 179 pages.

- **MLYNAREK, J. (1989),** "Selection de géotextiles pour retenir des particules solides en suspension dans l'eau de la municipalité de Caplan", Rapport Interne, École Polytechnique de Montréal, 22 pages.

- **MLYNAREK, J., LAFLEUR, J. ROLLIN, A.L., LEWANDOWSKI, J.B. (1989),** "Non Woven Geotextile Permeability Models", 2nd International Landfill Symposium, Sardinia, Italy, pp. XX1 - XX10.

- **MLYNAREK, J., LAFLEUR, J., ROLLIN, A.L., LOMBARD, G. (1993),** "Filtration Opening Size of Geotextiles by Hydrodynamic Sieving, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 16, 1, pp. 61 - 69.

- **MONTERRO, C.M., OVERMANN, L.K. (1990),** "Geotextile Filtration Performance Tests", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed.), Balkema, Rotterdam, p. 213.

- **PARZONKA, W., (1967),** "Étude des mixtures homogènes sol-eau, Mesures viscosimétriques et comportement rhéologique, Laboratoire de Mécanique des Fluides, Grenoble, 23 pages.

- **PICH, J. (1977),** "Gas Filtration Theory", Filtration, Principles and Practices, Part I, Clyde Orr, Editors: Albright A.L., Maddox R.N. and Mcketta, Vol.10, pp.

1 - 167.

- **PICH, J. (1966),** "Theory of Aerosol Filtration By Fibrous and Membrane Filters", Aerosol Science, Edited by C.N. Davies, Academic Press, London and New York, pp. 223 - 285.

- **RICHARDSON, G.N., MIDDLEBROOKS, P. (1991),** "A Simplified Design Method for Silt Fences", Geosynthetics '91 Conference, Atlanta, pp. 879 - 885.

- **RIGO, J.M., LHOTE, F., ROLLIN, A.L., MLYNAREK, J., LOMBARD, G. (1990),** "Influence of Geotextile Structure on Pore Size Determination", Geosynthetics, Microstructure and Performance, ASTM, STP 1076, I.D. Peggs, Ed., Philadelphie, pp. 90 - 101.

- **ROLLIN, A.L. (1986),** "Mécanisme de colmatage des géotextiles", Durability of geotextiles, RILEM, IGS, pp. 130 - 144.

- **ROLLIN, A.L., FAURE, Y., GOURC, J.P., MILLOT, F. (1985 a),** "Le comportement des géotextiles en filtration par analyse morphométrique", VIIème Réunion Internationale de Micromorphologie des Sols, Paris, pp. 537 - 544.

- **ROLLIN, A.L., BROUGHTON, R.S., BOLDUC, G., MORIN, J.J. (1985 b),**

"Synthetic Enveloppe Materials For Subsurface Drainage Tubes", 2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes, Alberta, Canada, pp. 51 - 60.

- **ROLLIN, A.L., MASOUNAVE, J., LAFLEUR, J. (1982),** "La perte de charge au travers des géotextiles: un nouveau modèle", Comptes rendus de la 2ème Conference Internationale sur les Géotextiles, Las Vegas, pp. 161-166.

- **ROLLIN, A.L., MLYNAREK, J., BOLDUC, G. (1988),** "Utilisation des géotextiles pour retenir des particules en suspension dans l'eau alimentant la station de pompage de la ville de Beauport", Rapport Interne, École Polytechnique de Montréal, 24 pages.

- **ROLLIN, A.L., MLYNAREK, J., BOLDUC, G. (1990 a),** "Study of Significance of Physical and Hydraulic Properties of Geotextiles Used as Envelopes in Subsurface Drainage Systems", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed.), Balkema, Rotterdam, p. 363

- **ROLLIN, A.L., MLYNAREK, J., VIDOVIC, A. (1990 b),** "Filtration Opening Size of Geotextiles: The Parameters Influencing the Pore Size Determination", Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Den Hoedt (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 295 - 299.

- **ROY, R. (1989),** "Cours de Mathématiques III", Département de Mathématiques Appliquées, École Polytechnique de Montréal, 125 pages.

- **SCHAAL, P. (1980),** "Contribution à l'étude des géotextiles", Thèse de Docteur Ingénieur, INSA, Lyon, 149 pages.

- **SCOTT, J.D. (1980),** "The Filtration-Permeability Test", 1st Canadian Symposium on Geotextiles, Calgary, Alberta, pp. 175 - 185.

- **SHERARD, J.L., DUNNIGAN, L.P., TALBOT, J.R. (1984),** "Filters for Silts and Clays", ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, N° 6, pp. 701 - 718.

- **SIMON, A., PAYANY, M., PUIG, J. (1982),** "Emploi des nappes géotextiles à structure alvéolaire pour la lutte contre l'érosion", Comptes rendus de la 2ème Conférence Internationale sur les Géotextiles, Las Vegas, pp. 247 - 251.

- **SOTTON, M. LECLERCQ, B., FEDOROFF, N., FAYOUX, D., PAUTE, J.L. (1982),** "Contribution à l'étude du colmatage des géotextiles. Approche morphologique", Comptes rendus de la 2ème Conférence Internationale sur les Géotextiles, Las Vegas, pp. 109 - 114.

- **STECHKINA, I.B., KIRSCH, A.A., FUCHS, N.A. (1969),** "Studies on Fibrous Aerosol Filters - IV Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration", Annals of Occupational. Hygiene., Vol.12, pp. 1- 8.

- **STINSON, J.A. (1990),** "Applying Drag Theory Models to the Design of Nonwoven Liquid Filters", 5*World Congress Filtration Proceedings, Nice, pp. 2.22 - 2.26.

- **SUNJOTO, S. (1986),** "La mesure de l'ouverture de filtration des géotextiles. Analyse des méthodes d'essai", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 167 pages.

- **TRUONG, T.V. (1975),** "Théorie de la filtration de l'eau à travers un lit filtrant uniforme appliqué au lit filtrant à gradation inversée", Thèse de Ph.D., Ecole Polytechnique de Montréal, 209 pages.

- **WARD, A.S. (1969),** "Fundamentals of cake filtration", Process Engineering Technic Evaluation, Loughborough University of Technology, pp. 4 - 9.

- **WHITE, P.A.F., SMITH, S.E. (1964),** "High-Efficiency Air Filtration", Butterworths, London, 314 pages.

- **ZIANI, N., LAFLEUR, J., MLYNAREK, J., ROLLIN, A.L. (1995),** "Efficiency of Suspension Filtration by Non Woven Geotextiles" Geosynthetics '95 Conference Proceedings, Nashville, Tennessee, Feb. 21 - 23, IFAI Publisher, pp. 253 - 265.

- **ZIANI, N., TANGUAY, M.G., LAFLEUR, J. (1995),** "Performances of Nonwoven Geotextiles In Suspension Filtration", Proceedings of the Sixth Asian Congress of Fluid Mechanics, Vol. II, Editors Y.T. Chew and C.P. Tso, May 22 - 26, Singapore, pp. 861 - 865.

- **ZIANI, N., LAFLEUR, J., MLYNAREK, J., TANGUAY, M.G. (1993),** "Modèle de prédiction de l'efficacité de filtration des suspensions par les géotextiles non tissés", Comptes rendus de la Conférence Conjointe SCGC-ASCE sur le Génie Environnemental, Montréal, Vol. 2, pp. 1145 - 1152.

- **ZIANI, N. (1989),** "Tassement des vases liquides", Comptes rendus du 23ème Congrès, Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH), Conseil National de la Recherche du Canada, Ottawa, 21 - 25 Août, Vol. 2, pp. B 383 - B 390.

- **ZIANI, N. (1987),** "Tassement et rhéologie des vases liquides du barrage retenue du Fergoug", Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO), Algérie, 103 pages.

ANNEXE 1

CALCUL DE L'INTÉGRALE DE L'ÉQUATION 3.44

Calcul du paramètre P, pourcentage de passant de l'équation 3.44, par la solution numérique de Gauss-Jordan (Dhatt et Touzot, 1981)

$$P = \int_{d_0}^{d_{max}} n \cdot \frac{a}{x} \left[\frac{2+\sigma (x+d_f)}{2+\sigma d_f} \right]^{2N} e^{-N.\sigma.x} dx \qquad (I.1)$$

ou encore:

$$P = n.a. \int_{d_0}^{d_{max}} f(x) \, . \, dx \qquad (I.2)$$

avec:

$$f(x) = \frac{1}{x} \left[\frac{2+\sigma (x+d_f)}{2+\sigma d_f} \right]^{2N} e^{-N.\sigma.x} \qquad (I.3)$$

La solution de Gauss-Jordan d'une intégrale dont les bornes sont - 1 et + 1 donnée par:

$$\int_{-1}^{+1} f(\xi) \, . \, d\xi = \sum_{i=1}^{i=n} W_i f(\xi_i) \qquad (I.4)$$

avec les valeurs de ξ_i et W_i données par le tableau I.1

Tableau I.1 Valeurs de Gauss-Jordan, ξ_i et W_i

ξ_i	W_i
0	0.41795 91836 73469
+ 0.40584 51513 77397	0.38183 00505 05119
- 0.40584 51513 77397	0.38183 00505 05119
+ 0.74153 11855 99394	0.27970 53914 89277
- 0.74153 11855 99394	0.27970 53914 89277
+ 0.94910 79123 42759	0.12948 49661 68870
- 0.94910 79123 42759	0.12948 49661 68870

Changement de variables de la fonction f(x) en f(ξ):

x varie de d_0 à d_{max} mais la courbe granulométrique du sol en suspension est approximée par deux droites pour x variant d'une part, de 0.1 à 24 μm et d'autre part, de 24 à 75 μm. Donc entre les points de la droite (1) limitée par 0.1 et 24, ξ doit varier entre -1 et +1 pour pouvoir appliquer le calcul de Gauss-Jordan; dans ce cas, la relation entre x et ξ est la suivante:

$$\xi = A.x + B \qquad (I.5)$$

$$-1 = A.0.1 + B \qquad (I.6)$$

$$+1 = A.24 + B \qquad (I.7)$$

d'où A = 0.083 et B = - 0.992:

$$\xi = 0.083\ x - 0.992 \qquad (I.8)$$

et:

$$x = 12.05\ \xi + 11.95 \qquad (I.9)$$

$$dx = 12.05\ d\xi \qquad (I.10)$$

Le même calcul donne pour x variant de 24 à 75 μm:

$$\xi = 0.0392\ x - 1.941 \qquad (I.11)$$

$$x = 25.51\ \xi + 49.52 \qquad (I.12)$$

$$dx = 25.51\ d\xi \qquad (I.13)$$

Dans l'équation I.2 donnant P, le paramètre "a" est égal à $a_1 = 0.04$ pour x compris entre 0.1 et 24 μm et à a_2 pour x variant de 24 à 75 μm. Dans ce cas, P devient::

$$P = n.\left[a_1.\int_{a_0}^{24} f(x).dx + a_2.\int_{24}^{x_{max}}.dx\right] \qquad (I.14)$$

ou encore en fonction de ξ:

$$P = n.\left[a_1.\int_{-1}^{+1} f(\xi_1).d\xi_1 + a_2.\int_{-1}^{+1}.f(\xi_2).d\xi_2\right] \qquad (I.15)$$

Les variables ξ_1, $d\xi_1$ et ξ_2, $d\xi_2$ sont données respectivement par les équations I.9, I.10 et I.12, I.13

ANNEXE II

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ESSAIS DE FILTRATION

Annexe II.1 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 1, géotextile A1, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 17 mars 1994 Géotextile: A1 $\rho w = 0.99325\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	2,7	1,6	1,1	-	-	-	-	-
4	-	3,75	3,38	0,37	-	-	-	-	-
6	-	5,9	5,6	0,3	-	-	-	-	-
8	-	7,8	7,6	0,2	-	-	-	-	-
10	-	9,6	9,4	0,2	-	-	-	-	-
12	36	11,7	11,5	0,2	97,87	98,5	0,99358	2,02	0,53
17	34	11,9	11,5	0,4	97,87	98,5	0,99357	1,94	0,51
22	34	11,9	11,5	0,4	97,86	98,5	0,99354	1,79	0,47
27	34,33	11,9	11,5	0,4	97,37	98	0,99354	1,75	0,46
32	34	11,9	11,5	0,4	98,86	99,5	0,99352	1,65	0,435
42	34	11,9	11,5	0,4	97,86	98,5	0,99351	1,60	0,42
52	34,33	11,9	11,5	0,4	96,12	96,75	0,99349	1,44	0,379
62	34	11,9	11,5	0,4	96,37	97	0,99348	1,43	0,376
72	34,67	11,95	11,5	0,45	95,87	96,5	0,99349	1,48	0,39
82	35	11,95	11,5	0,45	99,10	99,75	0,99349	1,44	0,38
92	35	12	11,5	0,5	97,86	98,5	0,99348	1,43	0,377
102	34,33	12	11,5	0,5	90,90	91,5	0,99348	1,39	0,365
112	34,33	12	11,5	0,5	97,11	97,75	0,99348	1,38	0,363
122	35	12	11,5	0,5	96,86	97,5	0,99348	1,40	0,367
132	35	12	11,5	0,5	99,10	99,75	0,99348	1,39	0,365

Annexe II.2 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 2, géotextile A2, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 18 mars 1994 Géotextile: A2 $\rho w = 0.99424\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3,8	1,4	2,4	-	-	-	-	-
4	-	4,55	3,7	0,85	-	-	-	-	-
6	-	6,1	5,55	0,55	-	-	-	-	-
8	-	7,9	7,5	0,4	-	-	-	-	-
10	-	9,7	9,5	0,2	-	-	-	-	-
12	36	12	11,5	0,5	90,26	90,75	0,99455	1,90	0,5
17	34	12	11,5	0,5	97,71	98,25	0,99454	1,86	0,49
22	34	12	11,5	0,5	92,99	93,5	0,99453	1,75	0,46
27	34,33	12	11,5	0,5	93,48	94	0,99452	1,69	0,445
32	34	12	11,5	0,5	97,96	98,5	0,99450	1,62	0,425
42	34	12,1	11,5	0,6	96,47	97	0,99450	1,61	0,423
52	34,33	12,2	11,5	0,7	96,46	97	0,99448	1,46	0,385
62	34	12,4	11,5	0,9	98,45	99	0,99446	1,37	0,361
72	34,67	12,7	11,5	1,2	97,21	97,75	0,99445	1,25	0,33
82	35	12,95	11,5	1,45	97,20	97,75	0,99441	1,05	0,275
92	35	13,1	11,5	1,6	98,45	99	0,99440	1,01	0,265
102	34,33	13,4	11,5	1,9	98,69	99,25	0,99439	0,93	0,244
112	34,33	13,55	11,5	2,05	97,95	98,5	0,99438	0,86	0,225
122	35	13,7	11,5	2,2	95,21	95,75	0,99438	0,85	0,224
132	35	13,8	11,5	2,3	99,44	100	0,99436	0,76	0,2

Annexe II.3 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 3, géotextile A3, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 21 mars 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.994241\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3,5	1,7	1,8	-	-	-	-	-
4	-	4,8	3,4	1,4	-	-	-	-	-
6	-	6	5,6	0,4	-	-	-	-	-
8	-	7,8	7,5	0,3	-	-	-	-	-
10	-	9,6	9,4	0,2	-	-	-	-	-
12	37	11,7	11,5	0,2	94,98	95,5	0,99456	1,98	0,52
17	34,67	11,9	11,5	0,4	94,98	95,5	0,99453	1,75	0,46
22	34,67	11,9	11,5	0,4	98,70	99,25	0,99451	1,63	0,43
27	35	11,9	11,5	0,4	97,96	98,5	0,99448	1,47	0,387
32	34,67	11,9	11,5	0,4	94,47	95	0,99447	1,38	0,363
42	35	11,9	11,5	0,4	98,95	99,5	0,99448	1,45	0,382
52	35,33	12	11,5	0,5	96,21	96,75	0,99444	1,22	0,32
62	35	12,2	11,5	0,7	98,20	98,75	0,99444	1,20	0,316
72	34,67	12,35	11,5	0,85	97,95	98,5	0,99443	1,18	0,311
82	34,67	12,5	11,5	1	97,45	98	0,99438	0,82	0,216
92	34,67	12,7	11,5	1,2	96,45	97	0,99436	0,73	0,192
102	35	12,9	11,5	1,4	97,20	97,75	0,99435	0,65	0,172
112	35	13,05	11,5	1,55	92,47	93	0,99435	0,65	0,17
122	35	13,2	11,5	1,7	97,45	98	0,99434	0,63	0,165
132	34,67	13,3	11,5	1,8	98,44	99	0,99434	0,60	0,157

Annexe II.4 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 4, géotextile A4, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 22 mars 1994 Géotextile: A4 $\rho w = 0.994\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	0	0	0	0	-	-	-	-	-
2	25	3	1,5	1,5	-	-	-	-	-
4	33,33	4,2	3,5	0,7	-	-	-	-	-
6	33,33	5,9	5,5	0,4	-	-	-	-	-
8	33,33	7,8	7,5	0,3	-	-	-	-	-
10	33,33	9,6	9,4	0,2	-	-	-	-	-
12	37	11,7	11,5	0,2	97,44	98	0,99428	1,71	0,45
17	34,33	12	11,5	0,5	97,19	97,75	0,99427	1,63	0,43
22	34,67	12	11,5	0,5	98,68	99,25	0,99426	1,60	0,42
27	34,67	12	11,5	0,5	93,46	94	0,99425	1,52	0,4
32	34,67	12	11,5	0,5	94,95	95,5	0,99424	1,48	0,39
42	34,67	12	11,5	0,5	98,18	98,75	0,99422	1,37	0,36
52	34,67	12	11,5	0,5	95,44	96	0,99417	1,03	0,27
62	34,67	12	11,5	0,5	91,96	92,5	0,99416	0,99	0,26
72	35	12	11,5	0,5	93,20	93,75	0,99413	0,80	0,21
82	35	12	11,5	0,5	96,43	97	0,99412	0,72	0,19
92	34,67	12,05	11,5	0,55	93,94	94,5	0,99407	0,46	0,12
102	34,67	12,05	11,5	0,55	95,43	96	0,99406	0,36	0,095
112	34,67	12,1	11,5	0,6	91,95	92,5	0,99405	0,33	0,087
122	34,67	12,15	11,5	0,65	96,92	97,5	0,99404	0,27	0,072
132	34,67	12,15	11,5	0,65	95,18	95,75	0,99404	0,27	0,07

Annexe II.5 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 5, géotextile B1, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 25 mars 1994 Géotextile: B1 $\rho w = 0.994241\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	2,3	1,6	0,7	-	-	-	-	-
4	-	3,95	3,5	0,45	-	-	-	-	-
6	-	5,85	5,5	0,35	-	-	-	-	-
8	-	7,7	7,4	0,3	-	-	-	-	-
10	-	9,4	9,2	0,2	-	-	-	-	-
12	34	11,7	11,5	0,2	97,96	98,5	0,99455	1,90	0,5
17	34,33	11,95	11,5	0,45	93,49	94	0,99454	1,84	0,485
22	34	12	11,5	0,5	95,97	96,5	0,99451	1,67	0,44
27	34	12	11,5	0,5	97,96	98,5	0,99452	1,71	0,45
32	34,33	12	11,5	0,5	98,45	99	0,99449	1,52	0,4
42	34	12,05	11,5	0,55	97,71	98,25	0,99449	1,52	0,4
52	34	12,1	11,5	0,6	98,20	98,75	0,99448	1,44	0,38
62	34,33	12,2	11,5	0,7	82,54	83	0,99448	1,44	0,38
72	34	12,3	11,5	0,8	94,23	94,75	0,99447	1,41	0,37
82	34	12,45	11,5	0,95	95,97	96,5	0,99447	1,39	0,366
92	34	12,6	11,5	1,1	94,97	95,5	0,99446	1,33	0,35
102	34,33	12,7	11,5	1,2	98,45	99	0,99446	1,33	0,35
112	34	12,85	11,5	1,35	98,20	98,75	0,99445	1,28	0,336
122	34,33	13	11,5	1,5	95,96	96,5	0,99445	1,25	0,33
132	34,33	13,1	11,5	1,6	98,95	99,5	0,99444	1,24	0,326

Annexe II.6 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 6, géotextile B2, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 27 mars 1994 Géotextile: B2 $\rho w = 0.99424\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4	1,6	2,4	-	-	-	-	-
4	-	5,75	3,4	2,35	-	-	-	-	-
6	-	7,2	5,35	1,85	-	-	-	-	-
8	-	8,65	7,35	1,3	-	-	-	-	-
10	-	10,3	9,35	0,95	-	-	-	-	-
12	35,33	12,35	11,5	0,85	96,22	96,75	0,99450	1,60	0,42
17	34,33	[illegible]	11,5	1,7	95,22	95,75	0,99448	1,48	0,39
22	34,67	14,05	11,5	2,55	97,46	98	0,99448	1,44	0,38
27	34,67	14,7	11,5	3,2	97,95	98,5	0,99446	1,37	0,36
32	34,33	15,1	11,5	3,6	98,20	98,75	0,99446	1,33	0,35
42	34	15,8	11,5	4,3	97,21	97,75	0,99445	1,25	0,33
52	34,33	16,8	11,5	5,3	95,96	96,5	0,99442	1,10	0,29
62	34	18,15	11,5	6,65	97,95	98,5	0,99440	0,95	0,25
65	34,33	18,8	11,5	7,3	98,44	99	0,99438	0,87	0,23

Annexe II.7 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 7, géotextile A1, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 7 Décembre 1993 Géotextile: A1 $\rho w = 0.9965\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3,2	1	2,2	-	-	-	-	-
3	-	3,5	2,4	1,1	-	-	-	-	-
5	-	4,9	4,4	0,5	-	-	-	-	-
10	-	8,3	8	0,3	-	-	-	-	-
12	34,67	11,8	11,5	0,3	98,96	99,25	0,99713	3,84	1,01
17	34	11,8	11,5	0,3	98,71	99	0,99712	3,80	1
22	34,67	11,8	11,5	0,3	98,21	98,5	0,99710	3,65	0,96
27	34,33	11,8	11,5	0,3	98,21	98,5	0,99708	3,57	0,94
32	34	11,8	11,5	0,3	98,70	99	0,99700	3,08	0,81
42	34	11,8	11,5	0,3	97,21	97,5	0,99698	2,93	0,77
52	34	11,8	11,5	0,3	98,20	98,5	0,99697	2,89	0,76
62	34,33	11,8	11,5	0,3	97,20	97,5	0,99696	2,81	0,74
72	34,33	11,85	11,5	0,35	95,71	96	0,99694	2,70	0,71
82	34,33	12	11,5	0,5	71,28	71,5	0,99692	2,57	0,675
92	34	12,1	11,5	0,6	93,71	94	0,99693	2,60	0,685
102	34,33	12,2	11,5	0,7	94,71	95	0,99690	2,47	0,65
112	34	12,4	11,5	0,9	98,44	98,75	0,99690	2,47	0,65
122	34	12,6	11,5	1,1	98,69	99	0,99690	2,42	0,636
132	34	12,65	11,5	1,15	93,21	93,5	0,99689	2,41	0,634

Annexe II.8 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 8, géotextile A2, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 5 Décembre 1993 Géotextile: A2 $\rho w = 0.9965\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,9	1,7	3,2	-	-	-	-	-
4	-	5,6	3,8	1,8	-	-	-	-	-
6	-	7	6	1	-	-	-	-	-
8	-	8,7	8	0,7	-	-	-	-	-
10	-	10,5	10,1	0,4	-	-	-	-	-
11	37	11,9	11,5	0,4	97,23	97,5	0,99718	4,18	1,1
16	35,33	12,9	11,5	0,6	97,46	97,75	0,99708	3,57	0,94
21	35,33	12,9	11,5	1,4	96,21	96,5	0,99703	3,27	0,86
26	35,33	13,4	11,5	1,9	99,20	99,5	0,99700	3,08	0,81
31	35,33	14,1	11,5	2,6	99,20	99,5	0,99696	2,81	0,74
41	33,33	15	11,5	3,5	97,70	98	0,99697	2,85	0,75
51	34	15,5	11,5	4	97,20	97,5	0,99693	2,66	0,7
61	34,67	16,15	11,5	4,65	95,20	95,5	0,99689	2,40	0,63
71	34,67	16,75	11,5	5,25	97,69	98	0,99688	2,32	0,61
81	34,33	17,55	11,5	6,05	97,69	98	0,99686	2,21	0,58
91	35,33	18,05	11,5	6,55	98,68	99	0,99677	1,63	0,43
101	34,67	18,7	11,5	7,2	98,43	98,75	0,99675	1,56	0,41
106	34,67	19,2	11,5	7,7	97,43	97,75	0,99669	1,18	0,31

Annexe II.9 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 9, géotextile A3, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 22 Novembre 1993 Géotextile: A3 $\rho w = 0.9968\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,3	1,4	2,9	-	-	-	-	-
5	-	5,8	4,9	0,9	-	-	-	-	-
10	-	10	9,6	0,4	-	-	-	-	-
12	35,67	11,8	11,5	0,3	94,75	95	0,99742	3,80	1
17	35,33	11,8	11,5	0,3	97,75	98	0,99740	3,69	0,97
22	35,2	11,8	11,5	0,3	96,25	96,5	0,99738	3,54	0,93
27	34,33	11,85	11,5	0,35	96,73	97	0,99726	2,81	0,74
32	34,67	11,85	11,5	0,35	98,48	98,75	0,99728	2,93	0,77
42	35	11,98	11,5	0,48	98,48	99	0,99723	2,66	0,7
52	34,67	12,1	11,5	0,6	98,72	97,5	0,99719	2,36	0,62
62	34,33	12,2	11,5	0,7	97,23	98,75	0,99719	2,36	0,62
72	34,33	12,3	11,5	0,8	98,47	99	0,99712	1,98	0,52
82	35	12,45	11,5	0,95	98,71	97,25	0,99709	1,75	0,46
92	35	12,5	11,5	1	96,96	98,25	0,99705	1,52	0,4
102	34,67	12,6	11,5	1,1	97,96	98,75	0,99704	1,44	0,38
112	34,67	12,7	11,5	1,2	98,45	98,5	0,99700	1,20	0,316
122	34,67	12,7	11,5	1,2	98,20	98,25	0,99699	1,14	0,3
132	34,67	12,7	11,5	1,2	97,95	98,25	0,99699	1,14	0,3

Annexe II.10 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 10, géotextile A4, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 23 Novembre 1993 Géotextile: A4 $\rho w = 0.9972\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
5	-	6	4,5	1,5	-	-	-	-	-
10	-	9,65	9,35	0,3	-	-	-	-	-
12	35,33	11,8	11,5	0,3	95,29	95,5	0,99778	3,54	0,93
17	32,67	11,9	11,5	0,4	95,78	96	0,99770	3,04	0,8
22	34	11,9	11,5	0,4	96,28	96,5	0,99771	3,12	0,82
27	33	11,9	11,5	0,4	97,77	[illegible]	0,99765	2,74	0,72
32	32,67	11,9	11,5	0,4	99,76	98	0,99765	2,74	0,72
42	33,33	12	11,5	0,5	99,77	100	0,99765	2,78	0,73
52	34	12,1	11,5	0,6	98,77	99	0,99764	2,70	0,71
62	34	12,2	11,5	0,7	90,78	91	0,99754	2,09	0,55
72	33	12,4	11,5	0,9	99,50	99,75	0,99748	1,71	0,45
82	34	12,5	11,5	1	99,24	99,5	0,99741	1,28	0,337
92	34	12,7	11,5	1,2	97,50	97,75	0,99740	1,25	0,33
102	34	13,05	11,5	1,55	96,75	97	0,99740	1,22	0,32
112	34,33	13,15	11,5	1,65	96,50	96,75	0,99739	1,18	0,31
122	34,33	13,4	11,5	1,9	97,24	97,5	0,99734	0,87	0,23
132	34	13,45	11,5	1,95	97,74	98	0,99734	0,87	0,23

Annexe II.11 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 11, géotextile B1, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 20 Novembre 1993 Géotextile: B1 $\rho w = 0.993\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4	1,6	2,4	-	-	-	-	-
4	-	5,7	3,6	2,1					
6	-	7,4	5,6	1,8					
8	-	8,8	7,6	1,2					
10	-	10,3	9,4	0,9	-	-	-	-	-
12	35,33	12	11,5	0,5	96,88	97,5	0,99365	3,99	1,05
17	32,67	12,9	11,5	1,4	88,18	88,75	0,99355	3,38	0,89
22	34	13,6	11,5	2,1	97,12	97,75	0,99354	3,27	0,86
27	33	14,05	11,5	2,55	99,10	[illegible]	0,99349	3,00	0,79
32	32,67	14,5	11,5	3	99,35	99,75	0,99349	2,97	0,78
42	33,33	15,25	11,5	3,75	99,35	100	0,99349	3,00	0,79
52	34	15,8	11,5	4,3	98,35	99	0,99342	2,59	0,68
62	34	16,45	11,5	4,95	96,11	96,75	0,99338	2,32	0,61
72	33	17,1	11,5	5,6	95,36	96	0,99334	2,05	0,54
82	34	17,65	11,5	6,15	97,35	98	0,99333	2,02	0,53

Annexe II.12 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 12, géotextile B2, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 10 Décembre 1993 Géotextile: B2 $\rho w = 0.993\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
1	-	4,4	0,6	3,8	-	-	-	-	-
5	-	9,7	4,1	5,6					
7	-	11,7	5,9	5,8					
9	-	13,4	7,7	5,7					
11	-	15	9,5	5,5	-	-	-	-	-
13	35,33	16,4	11,5	4,9	98,94	99,6	0,99337	2,28	0,6
18	32,67	19,1	11,5	7,6	94,85	95,5	0,99324	1,48	0,39

Annexe II.13 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 13, géotextile A1, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 28 mars 1994 Géotextile: A1 $\rho w = 0.99421\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3	1,6	1,4	-	-	-	-	-
4	-	4,05	3,5	0,55	-	-	-	-	-
6	-	5,75	5,5	0,25	-	-	-	-	-
8	-	7,6	7,4	0,2	-	-	-	-	-
10	-	9,4	9,2	0,2	-	-	-	-	-
12	36	11,7	11,5	0,2	98,34	98,75	0,99587	10,15	2,67
17	34,33	11,9	11,5	0,4	93,60	94	0,99580	9,70	2,55
22	34	11,9	11,5	0,4	98,07	98,5	0,99560	8,52	2,24
27	34,67	11,9	11,5	0,4	98,55	99	0,99549	7,83	2,06
32	34,33	11,9	11,5	0,4	97,06	97,5	0,99545	7,60	2
42	34,33	11,9	11,5	0,4	96,30	96,75	0,99534	6,92	1,82
52	34,33	11,9	11,5	0,4	97,79	98,25	0,99534	6,88	1,81
62	34,67	11,9	11,5	0,4	94,05	94,5	0,99524	6,27	1,65
72	34,67	11,9	11,5	0,4	95,29	95,75	0,99524	6,27	1,65
82	34,67	11,95	11,5	0,45	95,79	96,25	0,99521	6,12	1,61
92	34,33	11,95	11,5	0,45	98,53	99	0,99521	6,08	1,6
102	34,67	11,95	11,5	0,45	98,27	98,75	0,99516	5,82	1,53
112	34,67	11,95	11,5	0,45	97,52	98	0,99514	5,70	1,5
122	34,33	12	11,5	0,5	92,55	93	0,99512	5,59	1,47
132	34,67	12	11,5	0,5	96,53	97	0,99512	5,59	1,47

Annexe II.14 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 14, géotextile A2, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 30 mars 1994 Géotextile: A2 $\rho w = 0.99421\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,1	1,5	2,6	-	-	-	-	-
4	-	5,05	3,4	1,65	-	-	-	-	-
6	-	6,35	5,5	0,85	-	-	-	-	-
8	-	8,2	7,4	0,8	-	-	-	-	-
10	-	9,8	9,3	0,5	-	-	-	-	-
12	36,67	11,9	11,5	0,4	95,60	96	0,99578	9,62	2,53
17	35,33	12,1	11,5	0,6	97,83	98,25	0,99573	9,32	2,45
22	34,67	12,2	11,5	0,7	95,58	96	0,99562	8,59	2,26
27	34,67	12,3	11,5	0,8	95,56	96	0,99544	7,49	1,97
32	34,33	12,35	11,5	0,85	95,56	96	0,99539	7,19	1,89
42	34,67	12,55	11,5	1,05	97,53	98	0,99525	6,35	1,67
52	34,67	12,65	11,5	1,15	98,27	98,75	0,99517	5,86	1,54
62	34,33	12,7	11,5	1,2	97,52	98	0,99514	5,70	1,5
72	34,67	12,7	11,5	1,2	96,27	96,75	0,99502	4,98	1,31
82	34,67	12,85	11,5	1,35	98,26	98,75	0,99502	4,94	1,3
92	34,33	13	11,5	1,5	98,50	99	0,99491	4,30	1,13
102	34,67	13	11,5	1,5	98,00	98,5	0,99488	4,07	1,07
112	34,67	13	11,5	1,5	96,00	96,5	0,99479	3,54	0,93
122	34,67	13,2	11,5	1,7	96,99	97,5	0,99475	3,31	0,87
132	34,67	13,2	11,5	1,7	95,49	96	0,99466	2,78	0,73

Annexe II.15 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 15, géotextile A3, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 31 mars 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.9939\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3,9	1,3	2,6	-	-	-	-	-
4	-	5	3,2	1,8	-	-	-	-	-
6	-	6,25	5,15	1,1	-	-	-	-	-
8	-	7,85	7,2	0,65	-	-	-	-	-
10	-	9,4	9	0,4	-	-	-	-	-
12	35,33	11,8	10,9	0,3	97,55	98	0.99544	9,43	2,48
17	34,67	12,1	11,5	0,6	97,52	98	0,99510	7,34	1,93
22	34,33	12,2	11,5	0,7	94,28	94,75	0,99505	7,03	1,85
27	34,33	12,3	11,5	0,8	98,01	98,5	0,99504	6,96	1,83
32	34,67	12,35	11,5	0,85	93,03	93,5	0,99502	6,84	1,8
42	34,67	12,55	11,5	1,05	96,27	96,75	0,99499	6,69	1,76
52	34,33	12,65	11,5	1,15	96,25	96,75	0,99486	5,86	1,54
62	34,67	12,7	11,5	1,2	96,73	97,25	0,99470	4,90	1,29
72	34,33	12,7	11,5	1,2	98,71	99,25	0,99453	3,88	1,02
82	34,33	12,85	11,5	1,35	98,95	99,5	0,99446	3,42	0,9
92	34,33	13	11,5	1,5	98,19	98,75	0,99434	2,70	0,71
102	34,67	13	11,5	1,5	97,44	98	0,99428	2,32	0,61
112	34,67	13	11,5	1,5	97,19	97,75	0,99427	2,24	0,59
122	34,67	13,2	11,5	1,7	98,43	99	0,99421	1,90	0,5
132	34,67	13,2	11,5	1,7	99,17	99,75	0,99420	1,83	0,48

Annexe II.16 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 16, géotextile A4, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 4 avril 1994 Géotextile: A4 $\rho w = 0.99415\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	Cd (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,85	1,3	3,55	-	-	-	-	-
4	-	6,25	3,4	2,85	-	-	-	-	-
6	-	7,75	5,4	2,35	-	-	-	-	-
8	-	9	7,4	1,6	-	-	-	-	-
10	-	10,2	9,2	1	-	-	-	-	-
12	36	12,15	11,5	0,65	94,57	95	0,99551	8,29	2,18
17	35,33	13,05	11,5	1,55	96,30	96,75	0,99533	7,19	1,89
22	34,67	13,5	11,5	2	97,04	97,5	0,99528	6,92	1,82
27	34,67	13,75	11,5	2,25	98,28	98,75	0,99524	6,65	1,75
32	34,67	13,95	11,5	2,45	94,55	95	0,99523	6,58	1,73
42	34,33	14,7	11,5	3,2	97,52	98	0,99515	6,12	1,61
52	34,67	15,95	11,5	4,45	97,26	97,75	0,99503	5,40	1,42
62	34,33	16,7	11,5	5,2	95,01	95,5	0,99487	4,41	1,16
72	34,33	17,15	11,5	5,65	92,52	93	0,99479	3,92	1,03
82	34,67	17,2	11,5	5,7	98,47	99	0,99460	2,74	0,72
92	34,33	17,25	11,5	5,75	90,51	91	0,99456	2,51	0,66
102	34,67	17,3	11,5	5,8	94,97	95,5	0,99443	1,70	0,446
112	34,67	17,3	11,5	5,8	95,46	96	0,99437	1,37	0,36
122	34,33	17,35	11,5	5,85	97,94	98,5	0,99432	1,03	0,27
132	34,67	17,4	11,5	5,9	97,94	98,5	0,99427	0,76	0,2

Annexe II.17 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 17, géotextile B1, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 7 avril 1994 Géotextile: B1 $\rho w = 0.9942\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3,2	1,8	1,4	-	-	-	-	-
4	-	6,1	3,8	2,3	-	-	-	-	-
6	-	7	5,8	1,2	-	-	-	-	-
8	-	8,75	7,7	1,05	-	-	-	-	-
10	-	10,3	9,6	0,7	-	-	-	-	-
12	38,67	12,2	11,5	0,7	93,35	93,75	0,99574	9,43	2,48
17	34,67	12,45	11,5	0,95	96,33	96,75	0,99566	8,94	2,35
22	35,33	12,5	11,5	1	97,57	98	0,99562	8,67	2,28
27	35,33	12,5	11,5	1	98,55	99	0,99544	7,60	2
32	34,67	12,55	11,5	1,05	93,31	93,75	0,99530	6,73	1,77
42	34,67	12,6	11,5	1,1	96,54	97	0,99528	6,58	1,73
52	34,67	12,7	11,5	1,2	99,52	100	0,99520	6,08	1,6
62	35	12,85	11,5	1,35	98,02	98,5	0,99516	5,89	1,55
72	35	12,95	11,5	1,45	96,28	96,75	0,99510	5,51	1,45
82	34,67	13,05	11,5	1,55	96,77	97,25	0,99509	5,44	1,43
92	35	13,2	11,5	1,7	98,26	98,75	0,99500	4,87	1,28
102	34,67	13,25	11,5	1,75	94,27	94,75	0,99498	4,75	1,25
112	35	13,45	11,5	1,95	98,75	99,25	0,99497	4,68	1,23
122	35	13,55	11,5	2,05	96,76	97,25	0,99493	4,49	1,18
132	35	13,55	11,5	2,05	98,99	99,5	0,99491	4,33	1,14

Annexe II.18 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 18, géotextile B2, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 6 avril 1994 Géotextile: B2 $\rho w = 0.9942\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	Ca (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	6,6	1,6	5	-	-	-	-	-
4	-	8,9	3,5	5,4	-	-	-	-	-
6	-	10,7	5,5	5,2	-	-	-	-	-
8	-	11,8	7,5	4,3	-	-	-	-	-
10	-	12,9	9,5	3,4	-	-	-	-	-
12	-	14,2	11,3	2,9	-	-	-	-	-
13	34,67	14,4	11,3	3,1	95,54	96	0,99521	6,16	1,62
18	35,33	16,8	11,5	5,3	96,02	96,5	0,99505	5,21	1,37
23	35,33	17,9	11,5	6,4	93,28	93,75	0,99493	4,49	1,18
27	34,67	19,25	11,5	7,75	97,50	98	0,99489	4,22	1,11
29	34,67	19,6	11,5	8,1	97,50	98	0,99487	4,11	1,08

Annexe II.19 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 19, géotextile A1, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 2 février 1994 Géotextile: A1 $\rho w = 0.9942\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
1	-	3,8	0,2	3,6					
2	-	4,3	1,3	3	-	-	-	-	-
4	-	5,7	3,2	2,5	-	-	-	-	-
6	-	6,5	5,1	1,4	-	-	-	-	-
8	-	7,9	7,2	0,7	-	-	-	-	-
10	-	9,6	9	0,6	-	-	-	-	-
12	35	12	11,5	0,5	97,74	98	0,99731	19,01	5
17	34,33	12,9	11,5	1,4	94,25	94,5	0,99731	19,01	5
22	35	13,9	11,5	2,4	97,73	98	0,99724	18,59	4,89
27	34	14,4	11,5	2,9	97,96	98,25	0,99700	17,11	4,5
32	33,33	14,8	11,5	3,3	96,71	97	0,99699	17,03	4,48
42	34,67	15,35	11,5	3,85	99,67	100	0,99673	15,44	4,06
52	34,33	15,6	11,5	4,1	98,17	98,5	0,99669	15,25	4,01
62	34,33	15,7	11,5	4,2	97,41	97,75	0,99657	14,49	3,81
72	34,67	16,1	11,5	4,6	98,90	99,25	0,99645	13,73	3,61
82	34,33	15,7	11,5	4,2	98,15	98,5	0,99643	13,61	3,58
92	35,33	15,9	11,5	4,4	96,89	97,25	0,99632	12,97	3,41
102	34,67	16	11,5	4,5	97,39	97,75	0,99636	13,19	3,47
112	34,67	16	11,5	4,5	9,71	9,75	0,99629	12,78	3,36
122	33,33	16,05	11,5	4,55	96,63	97	0,99620	12,21	3,21
132	34,33	16,05	11,5	4,55	96,13	96,5	0,99615	11,94	3,14

Annexe II.20 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 20, géotextile A2, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 8 février 1994 Géotextile: A2 $\rho w = 0.9942\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
1	-	5,3	0,6	4,7					
2	-	6,7	1,3	5,4	-	-	-	-	-
4	-	8,3	3,25	5,05	-	-	-	-	-
6	-	9,4	5,1	4,3	-	-	-	-	-
8	-	10,2	7,25	2,95	-	-	-	-	-
10	-	11	9,1	1,9	-	-	-	-	-
12	30,67	13	11,5	1,5	96,74	97	0,99731	19,01	5
17	33,33	14,05	11,5	2,55	99,47	99,75	0,99717	18,17	4,78
22	33,33	14,2	11,5	2,7	97,71	98	0,99708	17,60	4,63
27	34,67	14,2	11,5	2,7	96,69	97	0,99685	16,20	4,26
32	34	14,3	11,5	2,8	98,44	98,75	0,99681	15,97	4,2
42	34	14,3	11,5	2,8	93,94	94,25	0,99666	15,06	3,96
52	33,33	14,6	11,5	3,1	98,65	99	0,99643	13,65	3,59
62	34	14,5	11,5	3	99,12	99,5	0,99615	11,90	3,13
72	34,33	14,75	11,5	3,25	98,62	99	0,99613	11,83	3,11
82	34	14,4	11,5	2,9	97,85	98,25	0,99596	10,76	2,83
92	34,33	14,5	11,5	3	98,32	98,75	0,99567	8,97	2,36
102	34,33	14,4	11,5	2,9	97,07	97,5	0,99558	8,44	2,22
112	35,33	14,65	11,5	3,15	94,07	94,5	0,99549	7,91	2,08
122	35,33	14,8	11,5	3,3	85,60	86	0,99531	6,81	1,79
132	35,33	14,6	11,5	3,1	97,04	97,5	0,99523	6,31	1,66

Annexe II.21 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 21, géotextile A3, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 10 février 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.99435\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,4	1,3	3,1	-	-	-	-	-
4	-	5,2	3,4	1,8	-	-	-	-	-
6	-	6,55	5,4	1,15	-	-	-	-	-
8	-	8	7,3	0,7	-	-	-	-	-
10	-	9,7	9,2	0,5	-	-	-	-	-
12	34,67	11,7	11,5	0,2	99,00	99,25	0,99746	19,01	5
17	34	12	11,5	0,5	98,74	99	0,99740	18,67	4,91
22	34,33	12,2	11,5	0,7	98,74	99	0,99735	18,33	4,82
27	34	12,4	11,5	0,9	97,97	98,25	0,99719	17,38	4,57
32	34,33	12,6	11,5	1,1	97,72	98	0,99716	17,19	4,52
42	34	13	11,5	1,5	97,20	97,5	0,99693	15,78	4,15
52	34,67	13,3	11,5	1,8	99,17	99,5	0,99666	14,11	3,71
62	34,33	13,4	11,5	1,9	93,67	94	0,99646	12,89	3,39
72	34,33	13,6	11,5	2,1	98,64	99	0,99639	12,47	3,28
82	34,33	13,8	11,5	2,3	98,13	98,5	0,99625	11,63	3,06
92	34	13,9	11,5	2,4	99,61	100	0,99611	10,76	2,83
102	34,33	14,1	11,5	2,6	97,35	97,75	0,99589	9,43	2,48
112	34,67	14,4	11,5	2,9	98,57	99	0,99569	8,21	2,16
122	34,67	14,55	11,5	3,05	95,09	95,5	0,99566	8,02	2,11
132	34,67	14,55	11,5	3,05	92,10	92,5	0,99565	7,95	2,09

Annexe II.22 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 22, géotextile A4, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 14 février 1994 Géotextile: A4 $\rho w = 0.99424\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	5,1	1,2	3,9	-	-	-	-	-
4	-	6,5	3,3	3,2	-	-	-	-	-
6	-	7,95	5,3	2,65	-	-	-	-	-
8	-	9,1	7,2	1,9	-	-	-	-	-
10	-	10,55	9,2	1,35	-	-	-	-	-
12	36,67	12,4	11,5	0,9	97,49	97,75	0,99732	18,82	4,95
17	34	13,45	11,5	1,95	98,72	99	0,99717	17,91	4,71
22	33,33	13,8	11,5	2,3	97,71	98	0,99703	17,07	4,49
27	33,33	14	11,5	2,5	98,69	99	0,99687	16,08	4,23
32	34	14,3	11,5	2,8	97,67	98	0,99665	14,75	3,88
42	34,33	15,2	11,5	3,7	98,64	99	0,99639	13,12	3,45
52	33,33	16,3	11,5	4,8	98,63	99	0,99629	12,51	3,29
62	33,33	17	11,5	5,5	97,88	98,25	0,99621	12,02	3,16
72	35,33	17,55	11,5	6,05	98,37	98,75	0,99612	11,52	3,03
82	34,67	17,75	11,5	6,25	99,10	99,5	0,99593	10,34	2,72
92	34,67	18	11,5	6,5	99,12	99,5	0,99621	12,02	3,16
102	34	17,9	11,5	6,4	97,79	98,25	0,99528	6,39	1,68
112	34,67	18,15	11,5	6,65	95,02	95,5	0,99499	4,56	1,2
122	34,33	18,3	11,5	6,8	98,75	99,25	0,99492	4,14	1,09
132	34	18,3	11,5	6,8	97,75	98,25	0,99491	4,11	1,08

Annexe II.23 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 23, géotextile B1, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 17 février 1994 Géotextile: B1 $\rho w = 0.99424\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,8	1,35	3,45	-	-	-	-	-
4	-	5,4	3,2	2,2	-	-	-	-	-
6	-	6,5	4,6	1,9	-	-	-	-	-
8	-	7,85	6,1	1,75	-	-	-	-	-
10	-	9,05	7,5	1,55	-	-	-	-	-
12	-	10,1	9	1,1	-	-	-	-	-
14	-	11,1	10	1,1	-	-	-	-	-
15	34,33	12,2	11,5	0,7	97,74	98	0,99735	19,01	5
20	34,33	13,7	11,5	2,2	94,24	94,5	0,99729	18,67	4,91
25	34,67	14,5	11,5	3	97,73	98	0,99724	18,37	4,83
30	33,33	14,95	11,5	3,45	97,98	98,25	0,99721	18,17	4,78
35	34	16,4	11,5	4,9	96,71	97	0,99703	17,07	4,49
45	34,33	16,7	11,5	5,2	99,68	100	0,99677	15,48	4,07
55	34,67	17,2	11,5	5,7	98,17	98,5	0,99661	14,49	3,81
65	34,33	18	11,5	6,5	97,39	97,75	0,99627	12,43	3,27
75	34,33	18,5	11,5	7	98,87	99,25	0,99622	12,09	3,18
85	34	19,2	11,5	7,7	98,13	98,5	0,99620	11,98	3,15
95	34,33	20,2	11,5	8,7	96,88	97,25	0,99617	11,79	3,1

Annexe II.24 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 24, géotextile B2, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 19 février 1994 Géotextile: B2 $\rho w = 0.9938\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	9,6	1	8,6	-	-	-	-	-
4	-	13,1	2,4	10,7	-	-	-	-	-
6	-	16,4	3,9	12,5	-	-	-	-	-
8	-	19	5,4	13,6	-	-	-	-	-
8,5	-	19,7	6	13,7	-	-	-	-	-

Annexe II.25 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 25, géotextile A1, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 11 avril 1994 Géotextile: A1 $\rho w = 0.99424\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3,8	1,7	2,1	-	-	-	-	-
4	-	4,8	3,7	1,1	-	-	-	-	-
6	-	6,7	5,6	1,1	-	-	-	-	-
8	-	8,05	7,55	0,5	-	-	-	-	-
10	-	9,75	9,5	0,25	-	-	-	-	-
12	38,33	11,85	11,5	0,35	97,56	97,5	1,00060	38,90	10,23
17	34,67	12,05	11,5	0,55	99,05	99	1,00046	38,02	10
22	34,67	12,05	11,5	0,55	98,78	98,75	1,00027	36,88	9,7
27	35	12,05	11,5	0,55	98,01	98	1,00012	35,93	9,45
32	34,67	12,05	11,5	0,55	96,50	96,5	1,00004	35,48	9,33
42	34,67	12,1	11,5	0,6	89,75	89,75	1,00002	35,36	9,3
52	34,67	12,1	11,5	0,6	94,99	95	0,99984	34,26	9,01
62	34,67	12,1	11,5	0,6	97,98	98	0,99984	34,22	9
72	34,67	12,15	11,5	0,65	99,98	100	0,99976	33,73	8,87
82	34,67	12,2	11,5	0,7	95,97	96	0,99966	33,16	8,72
92	34,67	12,25	11,5	0,75	93,71	93,75	0,99955	32,43	8,53
102	34,67	12,25	11,5	0,75	99,45	99,5	0,99951	32,21	8,47
112	35	12,3	11,5	0,8	99,45	99,5	0,99954	32,40	8,52
122	34,67	12,3	11,5	0,8	96,96	97	0,99959	32,70	8,6
132	34,67	12,3	11,5	0,8	96,46	96,5	0,99958	32,62	8,58

Annexe II.26 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 26, géotextile A2, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 14 avril 1994 Géotextile: A2 $\rho w = 0.994241 g/cm^3$ $\rho s = 2.63 g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	6,4	1,4	5	-	-	-	-	-
4	-	7,1	3,4	3,7	-	-	-	-	-
6	-	8,3	5,5	2,8	-	-	-	-	-
8	-	9,95	8,3	1,65	-	-	-	-	-
10	-	11,1	9,25	1,85	-	-	-	-	-
12	36,67	12,3	11,5	0,8	96,04	96	1,00041	37,72	9,92
17	35	12,3	11,5	0,8	97,02	97	1,00024	36,69	9,65
22	34,67	12,35	11,5	0,85	98,28	98,25	1,00033	37,22	9,79
27	34,67	12,4	11,5	0,9	98,78	98,75	1,00033	37,22	9,75
32	35	12,5	11,5	1	97,03	97	1,00031	37,07	9,47
42	34,67	12,65	11,5	1,15	100,01	100	1,00013	36,01	9,1
52	35	12,9	11,5	1,4	97,74	97,75	0,99990	34,60	9,06
62	34,67	13	11,5	1,5	94,49	94,5	0,99988	34,45	8,97
72	34,67	13,05	11,5	1,55	98,48	98,5	0,99982	34,11	8,16
82	35	13,15	11,5	1,65	99,18	99,25	0,99932	31,03	7,98
92	34,67	13,2	11,5	1,7	99,42	99,5	0,99920	30,34	7,94
102	35	13,3	11,5	1,8	97,42	97,5	0,99918	30,19	7,93
112	35	13,3	11,5	1,8	95,92	96	0,99917	30,15	7,924
122	35	13,45	11,5	1,95	96,67	96,75	0,99917	30,13	7,92
132	35	13,5	11,5	2	98,92	99	0,99917	30,11	7,92

Annexe II.27 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 27, géotextile A3, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 16 avril 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.99467\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,55	1,7	2,85	-	-	-	-	-
4	-	5,85	3,6	2,25	-	-	-	-	-
6	-	7,3	5,5	1,8	-	-	-	-	-
8	-	8,6	7,5	1,1	-	-	-	-	-
10	-	10,2	9,5	0,7	-	-	-	-	-
12	36,67	12,2	11,5	0,7	156,89	96,5	1,62580	3859,32	1015
17	35	12,2	11,5	0,7	96,82	96,75	1,00071	36,96	9,72
22	35	12,25	11,5	0,75	97,81	97,75	1,00063	36,43	9,58
27	34,67	12,3	11,5	0,8	95,05	95	1,00053	35,86	9,43
32	35	12,3	11,5	0,8	97,29	97,25	1,00041	35,10	9,23
42	34,67	12,4	11,5	0,9	96,54	96,5	1,00037	34,83	9,16
52	35	12,45	11,5	0,95	97,78	97,75	1,00028	34,33	9,03
62	34,67	12,55	11,5	1,05	97,26	97,25	1,00009	33,16	8,72
72	35	12,65	11,5	1,15	93,00	93	1,00004	32,81	8,63
82	35	12,75	11,5	1,25	98,75	98,75	1,00003	32,78	8,62
92	34,67	12,8	11,5	1,3	98,00	98	1,00001	32,62	8,58
102	35	12,9	11,5	1,4	99,50	99,5	1,00000	32,59	8,57
112	34,67	13	11,5	1,5	99,00	99	1,00001	32,66	8,59
122	35	13,15	11,5	1,65	93,49	93,5	0,99994	32,24	8,48
132	35	13,25	11,5	1,75	95,00	95	0,99996	32,36	8,51

Annexe II.28 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 28, géotextile A4, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 20 avril 1994 Géotextile: A4 $\rho w = 0.99536\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	4,9	1,8	3,1	-	-	-	-	-
4	-	6	3,8	2,2	-	-	-	-	-
6	-	7	5,8	1,2	-	-	-	-	-
8	-	9,25	7,8	1,45	-	-	-	-	-
10	-	10,6	9,8	0,8	-	-	-	-	-
12	37	12,2	11,5	0,7	96,14	96	1,00149	37,53	9,87
17	35	12,5	11,5	1	99,38	99,25	1,00135	36,62	9,63
22	35	12,5	11,5	1	89,12	89	1,00139	36,88	9,7
27	34,67	12,5	11,5	1	98,62	98,5	1,00125	36,05	9,48
32	35	12,55	11,5	1,05	97,09	97	1,00097	34,30	9,02
42	35	12,7	11,5	1,2	100,09	100	1,00087	33,69	8,86
52	35	12,8	11,5	1,3	95,08	95	1,00089	33,84	8,9
62	34,67	12,95	11,5	1,45	98,07	98	1,00069	32,62	8,58
72	35	13,1	11,5	1,6	97,53	97,5	1,00034	30,46	8,01
82	34,67	13,2	11,5	1,7	91,52	91,5	1,00023	29,77	7,83
92	35	13,2	11,5	1,7	96,01	96	1,00008	28,86	7,59
102	35	13,3	11,5	1,8	98,23	98,25	0,99984	27,41	7,21
112	35	13,4	11,5	1,9	97,22	97,25	0,99964	26,20	6,89
122	35	13,55	11,5	2,05	99,44	99,5	0,99939	24,64	6,48
132	35	13,6	11,5	2,1	98,94	99	0,99940	24,71	6,5

Annexe II.29 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 29, géotextile B1, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 23 avril 1994 Géotextile: B1 $\rho w = 0.99428\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	5,4	1,6	3,8	-	-	-	-	-
4	-	6,85	3,75	3,1	-	-	-	-	-
6	-	8,85	5,6	3,25	-	-	-	-	-
8	-	10,05	7,5	2,55	-	-	-	-	-
10	-	11,1	9,5	1,6	-	-	-	-	-
12	36,67	12,5	11,5	1	98,55	98,5	1,00051	38,10	10,02
17	35	12,65	11,5	1,15	99,52	99,5	1,00022	36,31	9,55
22	35	12,7	11,5	1,2	99,27	99,25	1,00019	36,12	9,5
27	34,67	12,75	11,5	1,25	98,26	98,25	1,00011	35,67	9,38
32	35	12,8	11,5	1,3	99,26	99,25	1,00008	35,48	9,33
42	34,67	13	11,5	1,5	99,01	99	1,00007	35,40	9,31
52	35	13,2	11,5	1,7	99,00	99	1,00002	35,10	9,23
62	34,67	13,5	11,5	2	98,50	98,5	0,99999	34,90	9,18
72	35	13,7	11,5	2,2	97,24	97,25	0,99995	34,64	9,11
82	35	13,95	11,5	2,45	96,49	96,5	0,99994	34,60	9,1
92	34,67	14,05	11,5	2,55	96,49	96,5	0,99991	34,41	9,05
102	35	14,2	11,5	2,7	97,99	98	0,99991	34,41	9,05
112	34,67	14,4	11,5	2,9	97,99	98	0,99990	34,37	9,04
122	35	14,6	11,5	3,1	97,74	97,75	0,99990	34,33	9,03
132	35	14,7	11,5	3,2	96,74	96,75	0,99989	34,30	9,02

Annexe II.30 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 30, géotextile B2, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 25 avril 1994 Géotextile: B2 $\rho w = 0.99421\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	10	1,2	8,8	-	-	-	-	-
4	-	13,4	2,75	10,65	-	-	-	-	-
6	-	16	4,3	11,7	-	-	-	-	-
8	-	18	6,1	11,9	-	-	-	-	-
10	-	19,9	8,25	11,65	-	-	-	-	-

Annexe II.31 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 31, géotextile A1, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 22 Août 1994 Géotextile: A1 $\rho w = 0.99341\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	3,85	0,85	3	-	-	-	-	-
4	-	4,75	3	1,75	-	-	-	-	-
6	-	7,05	5,5	1,55	-	-	-	-	-
8	-	8,35	7,5	0,85	-	-	-	-	-
10	-	10,55	9,8	0,75	-	-	-	-	-
12	34,67	12	11,5	0,5	95,84	95,25	1,00623	78,33	20,6
17	34,33	12,25	11,5	0,75	96,09	95,5	1,00617	77,95	20,5
22	34,67	12,3	11,5	0,8	95,08	94,5	1,00610	77,57	20,4
27	35	12,3	11,5	0,8	100,11	99,5	1,00617	77,95	20,5
32	34,33	12,35	11,5	0,85	99,34	98,75	1,00598	76,81	20,2
42	34,67	12,45	11,5	0,95	95,56	95	1,00592	76,43	20,1
52	34,33	12,55	11,5	1,05	100,09	99,5	1,00595	76,62	20,15
62	34,33	12,65	11,5	1,15	97,07	96,5	1,00586	76,05	20
72	34	12,75	11,5	1,25	93,29	92,75	1,00586	76,05	20
82	34,33	12,8	11,5	1,3	94,54	94	1,00574	75,36	19,82
92	34,67	12,85	11,5	1,35	96,30	95,75	1,00572	75,21	19,78
102	34	12,85	11,5	1,35	94,53	94	1,00567	74,90	19,7
112	34,33	12,9	11,5	1,4	95,28	94,75	1,00564	74,71	19,65
122	34,33	12,9	11,5	1,4	96,54	96	1,00561	74,56	19,61
132	34,33	12,9	11,5	1,4	99,28	98,75	1,00539	73,19	19,25

Annexe II.32 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 32, géotextile A2, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 24 Août 1994 Géotextile: A2 $\rho w = 0.99376\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	5,3	1,5	3,8	-	-	-	-	-
4	-	5,35	3,4	1,95	-	-	-	-	-
6	-	7,45	5,7	1,75	-	-	-	-	-
8	-	9,1	8	1,1	-	-	-	-	-
10	-	11	10,1	0,9	-	-	-	-	-
12	36	12,2	11,5	0,7	97,37	96,75	1,00639	77,19	20,3
17	36	12,7	11,5	1,2	98,63	98	1,00639	77,19	20,3
22	35,33	12,75	11,5	1,25	50,32	50	1,00636	77,00	20,25
27	35,67	12,8	11,5	1,3	95,85	95,25	1,00633	76,84	20,21
32	35,33	12,85	11,5	1,35	95,35	94,75	1,00631	76,69	20,17
42	35	12,9	11,5	1,4	100,13	99,5	1,00630	76,62	20,15
52	34,67	13	11,5	1,5	90,82	90,25	1,00631	76,73	20,18
62	34,33	13,05	11,5	1,55	98,34	97,75	1,00608	75,29	19,8
72	34,67	13,2	11,5	1,7	100,10	99,5	1,00607	75,21	19,78
82	34,33	13,3	11,5	1,8	99,85	99,25	1,00605	75,10	19,75
92	35	13,4	11,5	1,9	99,34	98,75	1,00602	74,90	19,7
102	34,67	13,6	11,5	2,1	95,06	94,5	1,00595	74,52	19,6
112	34,67	13,9	11,5	2,4	97,34	96,75	1,00609	75,36	19,82
122	34,67	13,9	11,5	2,4	99,83	99,25	1,00589	74,14	19,5
132	34,67	13,9	11,5	2,4	99,33	98,75	1,00589	74,14	19,5

Annexe II.33 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 33, géotextile A3, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 26 Août 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.99362\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	8,5	4,5	4	-	-	-	-	-
4	-	10,1	8	2,1	-	-	-	-	-
6	-	11,9	10	1,9	-	-	-	-	-
8	-	12	10,8	1,2	-	-	-	-	-
10	-	11,95	11	0,95	-	-	-	-	-
12	35,33	12,25	11,5	0,75	98,62	98	1,00638	77,95	20,5
17	35	12,3	11,5	0,8	98,35	97,75	1,00619	76,81	20,2
22	34,33	12,35	11,5	0,85	96,10	95,5	1,00626	77,26	20,32
27	34,6	12,4	11,5	0,9	94,56	94	1,00594	75,29	19,8
32	34,67	12,5	11,5	1	94,81	94,25	1,00593	75,25	19,79
42	34,33	12,7	11,5	1,2	97,32	96,75	1,00591	75,10	19,75
52	34,33	12,8	11,5	1,3	98,58	98	1,00592	75,17	19,77
62	34,33	13	11,5	1,5	98,82	98,25	1,00585	74,71	19,65
72	34,33	13,25	11,5	1,75	99,57	99	1,00574	74,07	19,48
82	34,67	13,4	11,5	1,9	98,30	97,75	1,00563	73,38	19,3
92	35	13,5	11,5	2	99,06	98,5	1,00565	73,54	19,34
102	34,67	13,8	11,5	2,3	97,04	96,5	1,00560	73,19	19,25
112	34,67	13,9	11,5	2,4	95,53	95	1,00554	72,81	19,15
122	34,33	14	11,5	2,5	95,27	94,75	1,00549	72,51	19,07
132	34,33	14	11,5	2,5	98,28	97,75	1,00544	72,24	19

Annexe II.34 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 34, géotextile A4, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 28 Août 1994 Géotextile: A4 $\rho w = 0.99366\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	9,55	5,8	3,75	-	-	-	-	-
4	-	11,4	8,1	3,3	-	-	-	-	-
6	-	11,8	10,3	1,5	-	-	-	-	-
8	-	11,9	10,45	1,45	-	-	-	-	-
10	-	12	11	1	-	-	-	-	-
12	35	12,45	11,5	0,95	97,33	96,75	1,00604	75,67	19,9
17	34,67	12,7	11,5	1,2	96,31	95,75	1,00585	74,52	19,6
22	34,67	12,9	11,5	1,4	98,83	98,25	1,00589	74,71	19,65
27	34,33	13	11,5	1,5	99,58	99	1,00585	74,49	19,59
32	34,33	13,25	11,5	1,75	98,05	97,5	1,00561	73,00	19,2
42	34,33	13,6	11,5	2,1	97,29	96,75	1,00562	73,12	19,23
52	34	13,8	11,5	2,3	100,28	99,75	1,00536	71,48	18,8
62	34	14	11,5	2,5	99,02	98,5	1,00533	71,29	18,75
72	34,33	14	11,5	2,5	96,77	96,25	1,00536	71,48	18,8
82	34,33	14,05	11,5	2,55	95,24	94,75	1,00517	70,34	18,5
92	34,67	14,05	11,5	2,55	97,24	96,75	1,00501	69,39	18,25
102	34	14,1	11,5	2,6	96,23	95,75	1,00501	69,39	18,25
112	34,33	14,1	11,5	2,6	98,99	98,5	1,00496	69,05	18,16
122	34,33	14,15	11,5	2,65	98,48	98	1,00490	68,71	18,07
132	34,33	14,15	11,5	2,65	98,22	97,75	1,00486	68,44	18

Annexe II.35 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 35, géotextile B1, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 30 Août 1994 Géotextile: B1 $\rho w = 0.9942\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	5,3	2	3,3	-	-	-	-	-
4	-	6,2	3,8	2,4	-	-	-	-	-
6	-	7,5	5,4	2,1	-	-	-	-	-
8	-	8,1	6,6	1,5	-	-	-	-	-
10	-	10,8	9,6	1,2	-	-	-	-	-
12	35	12,4	11,5	0,9	100,21	99,5	1,00711	78,90	20,75
17	34,67	12,7	11,5	1,2	98,44	97,75	1,00706	78,59	20,67
22	34,67	12,95	11,5	1,45	96,18	95,5	1,00707	78,67	20,69
27	35	13,3	11,5	1,8	100,70	100	1,00695	77,95	20,5
32	34,67	13,35	11,5	1,85	99,93	99,25	1,00683	77,19	20,3
42	34,33	13,7	11,5	2,2	99,42	98,75	1,00683	77,19	20,3
52	34,33	13,85	11,5	2,35	96,90	96,25	1,00680	77,00	20,25
62	34,33	14,2	11,5	2,7	98,16	97,5	1,00678	76,88	20,22
72	34,33	14,4	11,5	2,9	99,41	98,75	1,00665	76,08	20,01
82	34,67	14,7	11,5	3,2	99,66	99	1,00670	76,39	20,09
92	34,67	14,8	11,5	3,3	98,91	98,25	1,00667	76,24	20,05
102	34,33	14,95	11,5	3,45	98,40	97,75	1,00664	76,05	20
112	34	15,1	11,5	3,6	98,15	97,5	1,00662	75,93	19,97
122	34,33	15,25	11,5	3,75	96,62	96	1,00647	75,02	19,73
132	34,33	15,25	11,5	3,75	99,14	98,5	1,00645	74,90	19,7

Annexe II.36 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 36, géotextile B2, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s

Date: 1 septembre 1994 Géotextile: B2 $\rho w = 0.99421\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	10,5	1	9,5	-	-	-	-	-
4	-	15,2	1,7	13,5	-	-	-	-	-
5	-	15,85	2	13,85	-	-	-	-	-

Annexe II.37 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 37, géotextile A3, Co = 0.5 g/l, Q1 = 70 cm^3/s

Date: 23 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.99438\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	7,5	5,1	2,4	-	-	-	-	-
4	-	8,8	7,2	1,6	-	-	-	-	-
6	-	10,6	9,5	1,1	-	-	-	-	-
8	69,5	11,8	11,5	0,3	98,97	99,5	0,99463	1,52	0,4
13	68,5	12	11,5	0,5	96,97	97,5	0,99461	1,41	0,37
18	69	12,1	11,5	0,6	94,73	95,25	0,99459	1,29	0,34
23	69	12,3	11,5	0,8	95,48	96	0,99455	1,05	0,275
28	68,5	12,6	11,5	1,1	97,47	98	0,99455	1,06	0,28
38	69	12,8	11,5	1,3	97,21	97,75	0,99452	0,86	0,225
48	68,5	13,2	11,5	1,7	95,47	96	0,99451	0,80	0,21
58	68,5	13,3	11,5	1,8	97,46	98	0,99448	0,63	0,165
68	69	13,55	11,5	2,05	98,95	99,5	0,99448	0,61	0,16
78	69	13,75	11,5	2,25	98,20	98,75	0,99448	0,59	0,155
88	68,5	13,85	11,5	2,35	96,22	96,75	0,99448	0,58	0,153
98	69	13,9	11,5	2,4	95,22	95,75	0,99447	0,57	0,15

Annexe II.38 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 38, géotextile A3, Co = 1 g/l, Q1 = 70 cm^3/s

Date: 25 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.99518\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	6	3,2	2,8	-	-	-	-	-
4	-	8,3	6,5	1,8	-	-	-	-	-
6	-	9,9	8,75	1,15	-	-	-	-	-
8	70	11,85	11,5	0,35	96,33	96,75	0,99568	3,08	0,81
13	69,5	11,9	11,5	0,4	98,07	98,5	0,99562	2,66	0,7
18	69	12	11,5	0,5	93,84	94,25	0,99565	2,85	0,75
23	68,5	12,2	11,5	0,7	97,31	97,75	0,99554	2,21	0,58
28	69	12,35	11,5	0,85	95,57	96	0,99557	2,40	0,63
38	68,5	12,7	11,5	1,2	97,56	98	0,99550	1,98	0,52
48	69	13	11,5	1,5	97,06	97,5	0,99545	1,63	0,43
58	69	13,3	11,5	1,8	95,81	96,25	0,99541	1,43	0,375
68	69	13,65	11,5	2,15	94,07	94,5	0,99540	1,33	0,35
78	68,5	13,85	11,5	2,35	93,32	93,75	0,99538	1,22	0,32
88	69	14	11,5	2,5	91,57	92	0,99537	1,16	0,305
98	69	14	11,5	2,5	9,46	9,5	0,99536	1,10	0,29

Annexe II.39 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 39, géotextile A3, Co = 2.5 g/l, Q1 = 70 cm/s

Date: 27 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.99443$ g/cm^3 $\rho s = 2.63$ g/cm^3

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	Cv *0.0001	Cd (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	5,2	1,6	3,6	-	-	-	-	-
4	-	7,9	5,6	2,3	-	-	-	-	-
6	-	9,95	8,1	1,85	-	-	-	-	-
8	71	12	11,5	0,5	99,08	99,5	0,99578	8,25	2,17
13	69,5	12,25	11,5	0,75	98,56	99	0,99556	6,88	1,81
18	69	12,5	11,5	1	97,57	98	0,99557	6,96	1,83
23	69	12,7	11,5	1,2	97,30	97,75	0,99539	5,89	1,55
28	68,5	12,85	11,5	1,35	94,81	95,25	0,99541	6,01	1,58
38	68,5	13,15	11,5	1,65	95,79	96,25	0,99524	4,98	1,31
48	69	13,35	11,5	1,85	97,77	98,25	0,99509	4,03	1,06
58	69	13,65	11,5	2,15	98,25	98,75	0,99495	3,16	0,83
68	68,5	13,85	11,5	2,35	98,00	98,5	0,99492	2,97	0,78
78	69	14,1	11,5	2,6	96,00	96,5	0,99485	2,57	0,675
88	69,5	14,3	11,5	2,8	97,00	97,5	0,99485	2,59	0,68
98	69,5	14,3	11,5	2,8	96,00	96,5	0,99485	2,57	0,675

Annexe II.40 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 40, géotextile A3, Co = 5 g/l, Q1 = 70 cm^3/s

Date: 29 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.99428\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	7,8	2,7	5,1	-	-	-	-	-
4	-	9,6	6,5	3,1	-	-	-	-	-
6	-	11,7	9,8	1,9	-	-	-	-	-
8	71	12,1	11,5	0,6	96,47	96,75	0,99708	17,11	4,5
13	69	12,5	11,5	1	95,69	96	0,99682	15,51	4,08
18	70	12,8	11,5	1,3	94,44	94,75	0,99677	15,21	4
23	69	13,3	11,5	1,8	98,16	98,5	0,99652	13,69	3,6
28	68,5	13,6	11,5	2,1	97,41	97,75	0,99655	13,88	3,65
38	68,5	14,3	11,5	2,8	98,13	98,5	0,99623	11,90	3,13
48	69	15,05	11,5	3,55	93,87	94,25	0,99592	10,00	2,63
58	69	15,75	11,5	4,25	98,34	98,75	0,99580	9,28	2,44
68	68	16,75	11,5	5,25	98,56	99	0,99557	7,91	2,08
78	69	16,7	11,5	5,2	94,57	95	0,99546	7,22	1,9
88	69,5	16,9	11,5	5,4	95,81	96,25	0,99541	6,92	1,82
98	69	17	11,5	5,5	93,82	94,25	0,99540	6,84	1,8

Annexe II.41 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 41, géotextile A3, Co = 0.5 g/l, Q1 = 105 cm^3/s

Date: 5 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.9939\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	6,6	5,5	1,1	-	-	-	-	-
4	-	10,95	10,6	0,35	-	-	-	-	-
5	103,75	11,8	11,5	0,3	95,68	96,25	0,99411	1,25	0,33
10	102,5	12,1	11,5	0,6	98,66	99,25	0,99406	1,01	0,265
15	103	12,7	11,5	1,2	98,16	98,75	0,99407	1,03	0,27
20	103,75	13,2	11,5	1,7	94,68	95,25	0,99404	0,84	0,22
25	103	13,5	11,5	2	95,43	96	0,99404	0,86	0,225
35	103,75	13,9	11,5	2,4	98,16	98,75	0,99401	0,65	0,17
45	103	14,2	11,5	2,7	92,44	93	0,99400	0,63	0,165
55	102,5	14,3	11,5	2,8	95,17	95,75	0,99399	0,57	0,15
65	103	14,35	11,5	2,85	94,18	94,75	0,99399	0,55	0,145

Annexe II.42 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 42, géotextile A3, Co = 1 g/l, Q1 = 105 cm^3/s

Date: 7 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.9944\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	8,5	4,2	4,3	-	-	-	-	-
4	-	10,8	8,5	2,3	-	-	-	-	-
5	105	12,1	11,5	0,6	98,49	99	0,99487	2,85	0,75
10	103,75	12,2	11,5	0,7	98,24	98,75	0,99479	2,38	0,625
15	103	12,8	11,5	1,3	96,00	96,5	0,99480	2,43	0,64
20	103,75	13,25	11,5	1,75	95,74	96,25	0,99470	1,86	0,49
25	103	13,6	11,5	2,1	94,00	94,5	0,99475	2,13	0,56
35	103	13,95	11,5	2,45	91,98	92,5	0,99443	0,16	0,041
45	103,75	14,25	11,5	2,75	95,48	96	0,99462	1,37	0,36
55	103	14,4	11,5	2,9	94,24	94,75	0,99459	1,14	0,3
65	103	14,45	11,5	2,95	92,50	93	0,99457	1,06	0,28

Annexe II.43 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 43, géotextile A3, Co = 2.5 g/l, Q1 = 105 cm^3/s

Date: 11 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.9941\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H *amont* (cm)	H *aval* (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	C_v *0.0001	C_d (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	10	3,8	6,2	-	-	-	-	-
4	-	11,1	8,2	2,9	-	-	-	-	-
5	104	12,3	11,5	0,8	97,77	98,25	0,99515	6,43	1,69
10	103,75	12,5	11,5	1	95,02	95,5	0,99500	5,48	1,44
15	104	12,7	11,5	1,2	93,53	94	0,99498	5,36	1,41
20	103	13,1	11,5	1,6	93,02	93,5	0,99484	4,52	1,19
25	103	13,4	11,5	1,9	97,25	97,75	0,99485	4,56	1,2
35	102,5	13,95	11,5	2,45	97,98	98,5	0,99467	3,50	0,92
45	103	14,25	11,5	2,75	96,22	96,75	0,99452	2,55	0,67
55	103	14,5	11,5	3	92,74	93,25	0,99451	2,51	0,66
65	102,5	14,6	11,5	3,1	96,96	97,5	0,99450	2,47	0,65

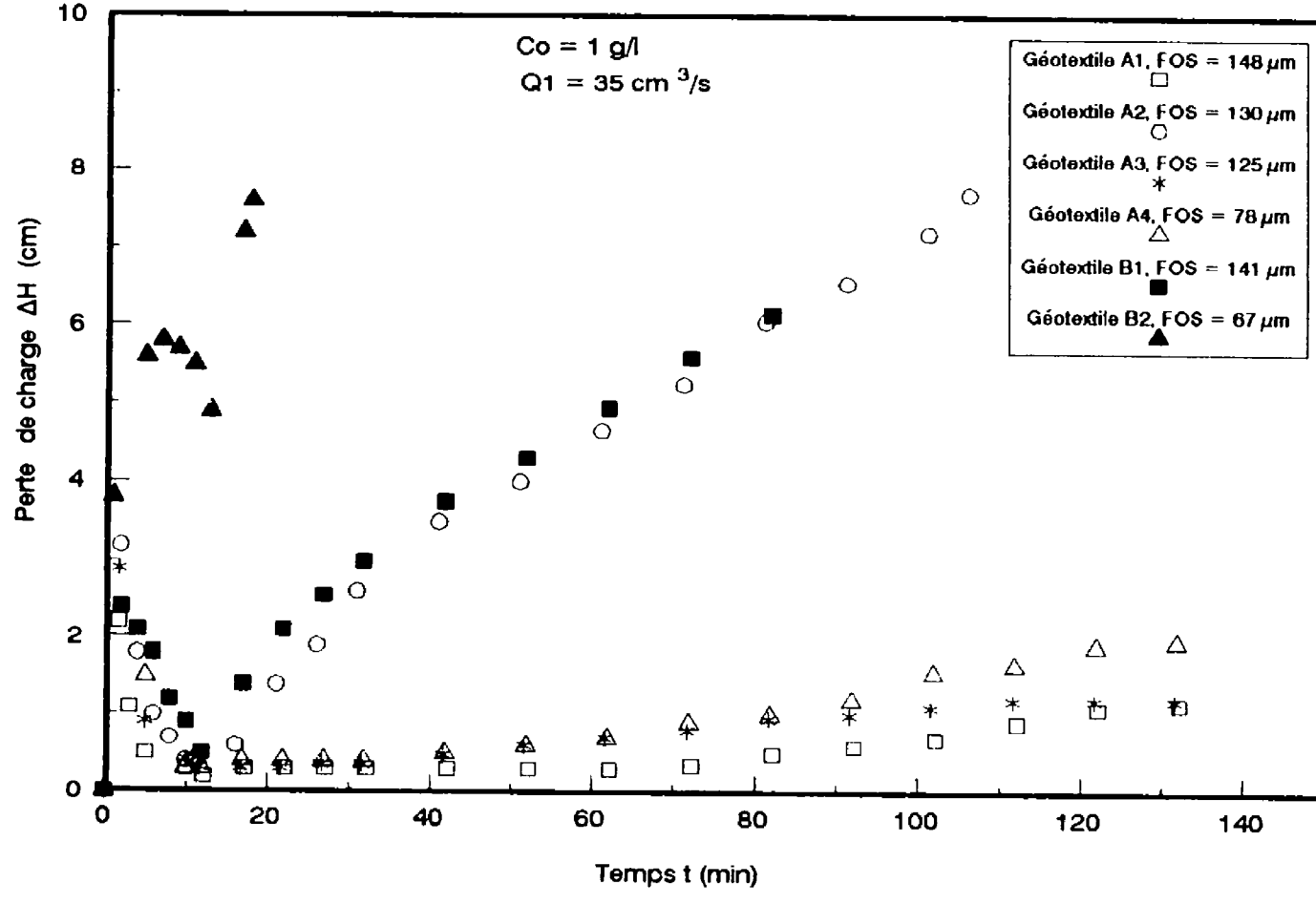
Annexe II.44 Résultats expérimentaux de l'essai de filtration No 44, géotextile A3, Co = 5 g/l, Q1 = 105 cm^3/s

Date: 14 septembre 1994 Géotextile: A3 $\rho w = 0.9938\ g/cm^3$ $\rho s = 2.63\ g/cm^3$

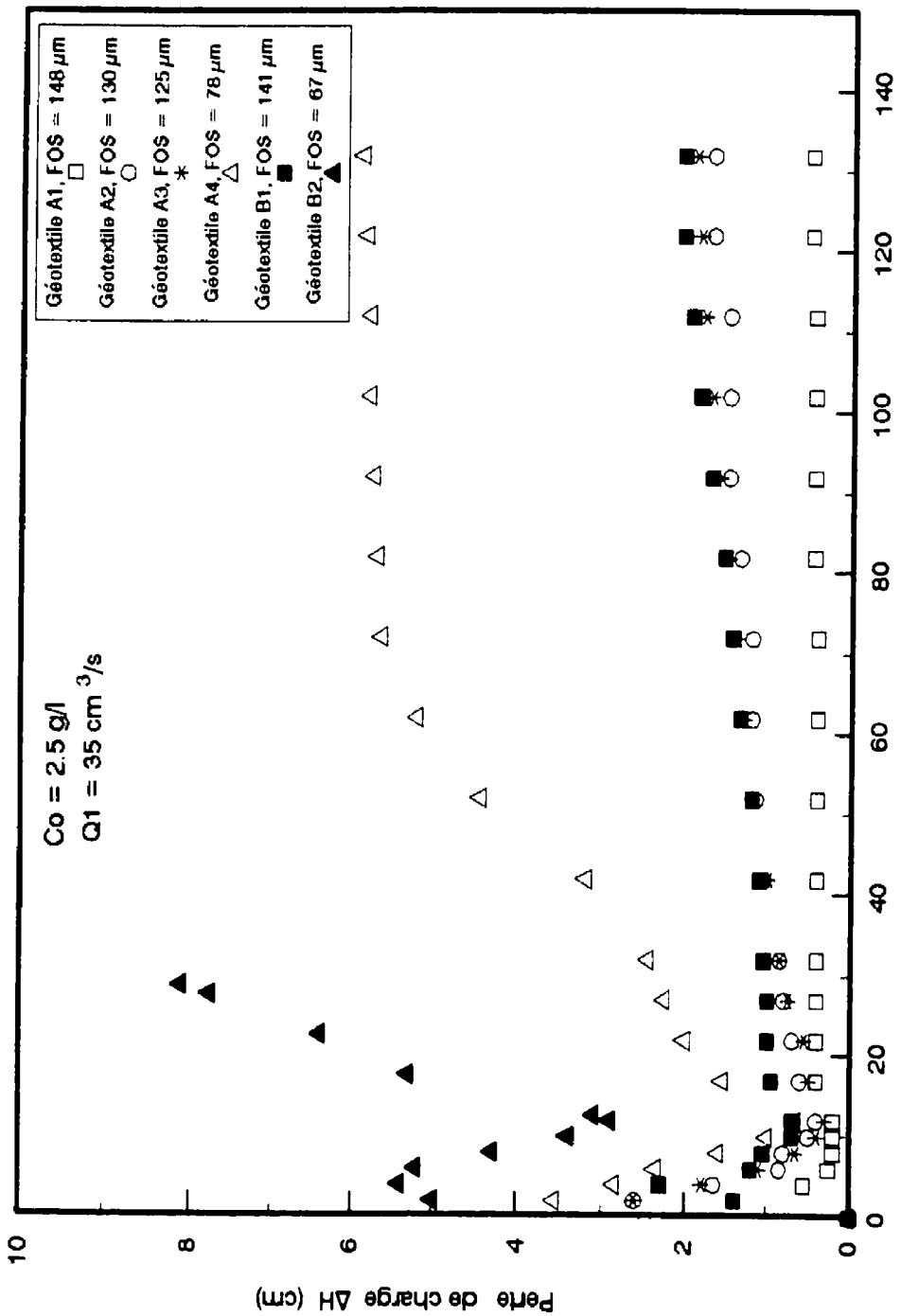
					Mesures des concentrations				
Temps t (min)	Débits Q (cm^3/s)	H amont (cm)	H aval (cm)	ΔH (cm)	Masses (g)	Volumes (cm^3)	ρ_m (g/cm^3)	Cv *0.0001	Cd (g/l)
0	-	0	0	0	-	-	-	-	-
2	-	10	3,8	6,2	-	-	-	-	-
4	-	11,1	8,2	2,9	-	-	-	-	-
5	103,75	12,3	11,5	0,8	99,09	99,5	0,99588	12,70	3,34
10	104	12,5	11,5	1	97,58	98	0,99567	11,41	3
15	103	12,7	11,5	1,2	97,32	97,75	0,99563	11,18	2,94
20	103,5	13,1	11,5	1,6	93,81	94,25	0,99536	9,51	2,5
25	103	13,4	11,5	1,9	92,32	92,75	0,99536	9,51	2,5
35	104	13,95	11,5	2,45	94,53	95	0,99503	7,53	1,98
45	103	14,25	11,5	2,75	96,26	96,75	0,99494	6,96	1,83
55	103	14,5	11,5	3	95,76	96,25	0,99489	6,69	1,76
65	103,75	14,6	11,5	3,1	97,00	97,5	0,99489	6,65	1,75

ANNEXE III

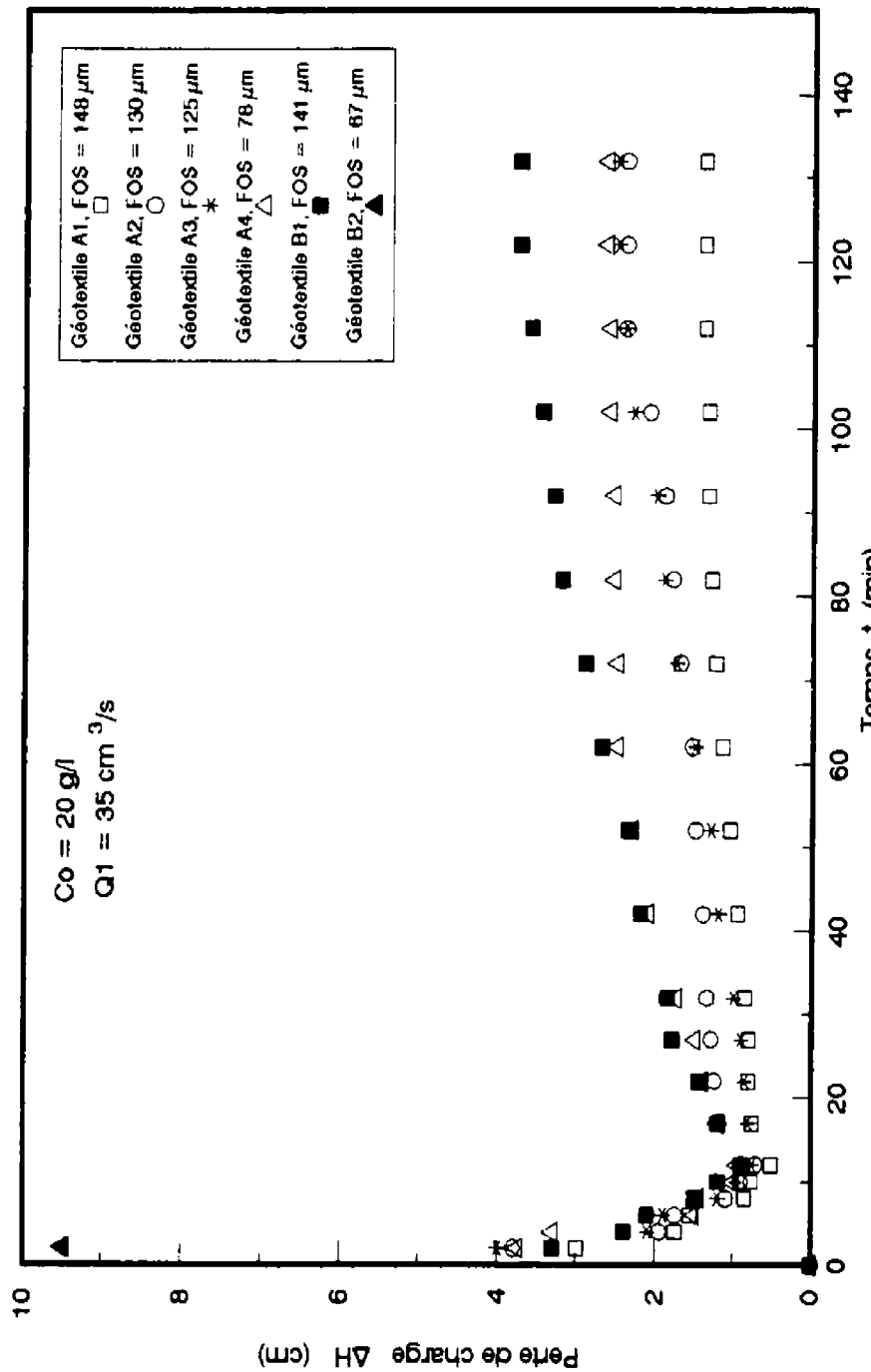
VARIATION DES PERTES DE CHARGE EN FONCTION DU TEMPS



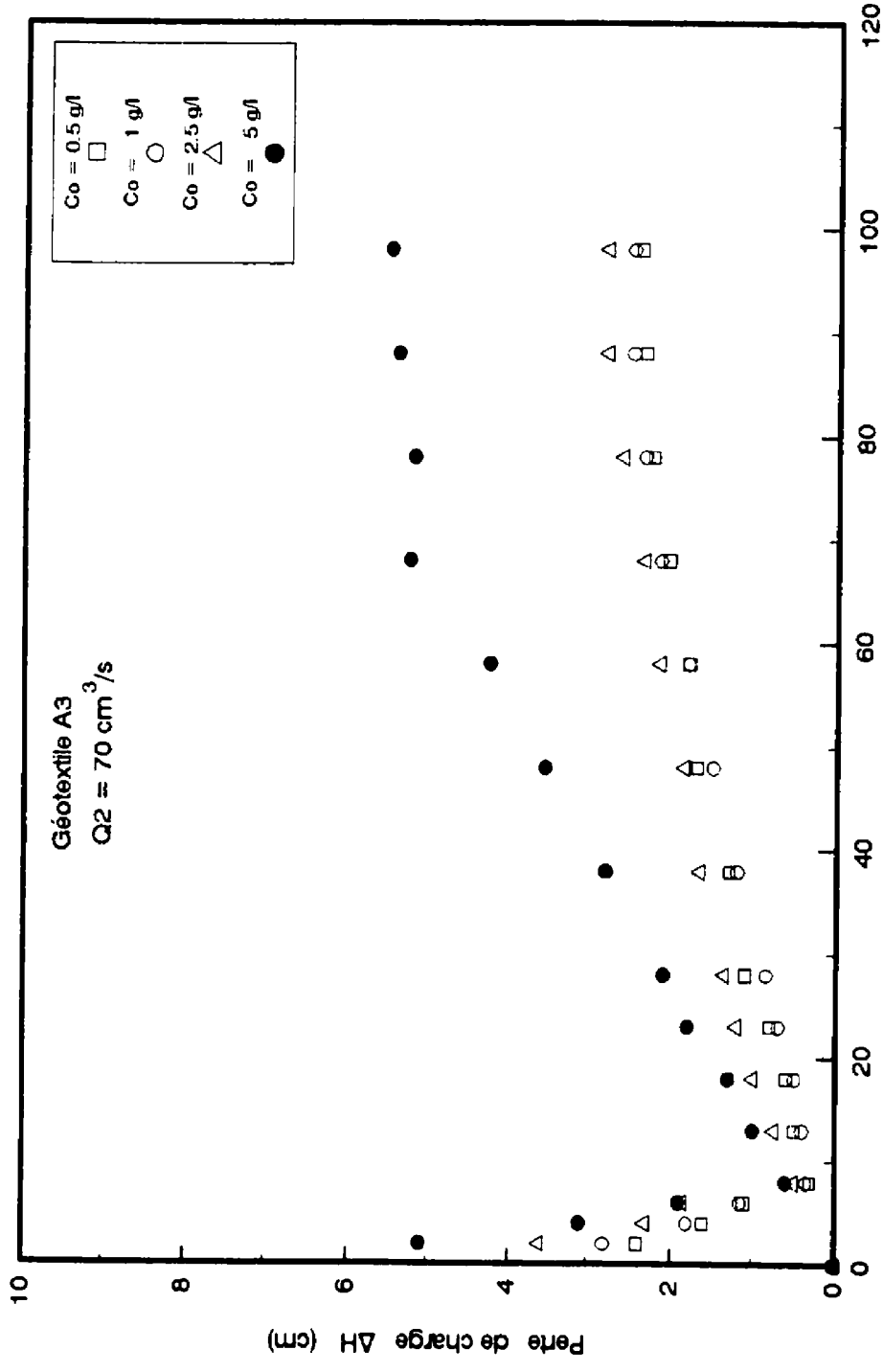
Annexe III.1 Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm ^{3}/s



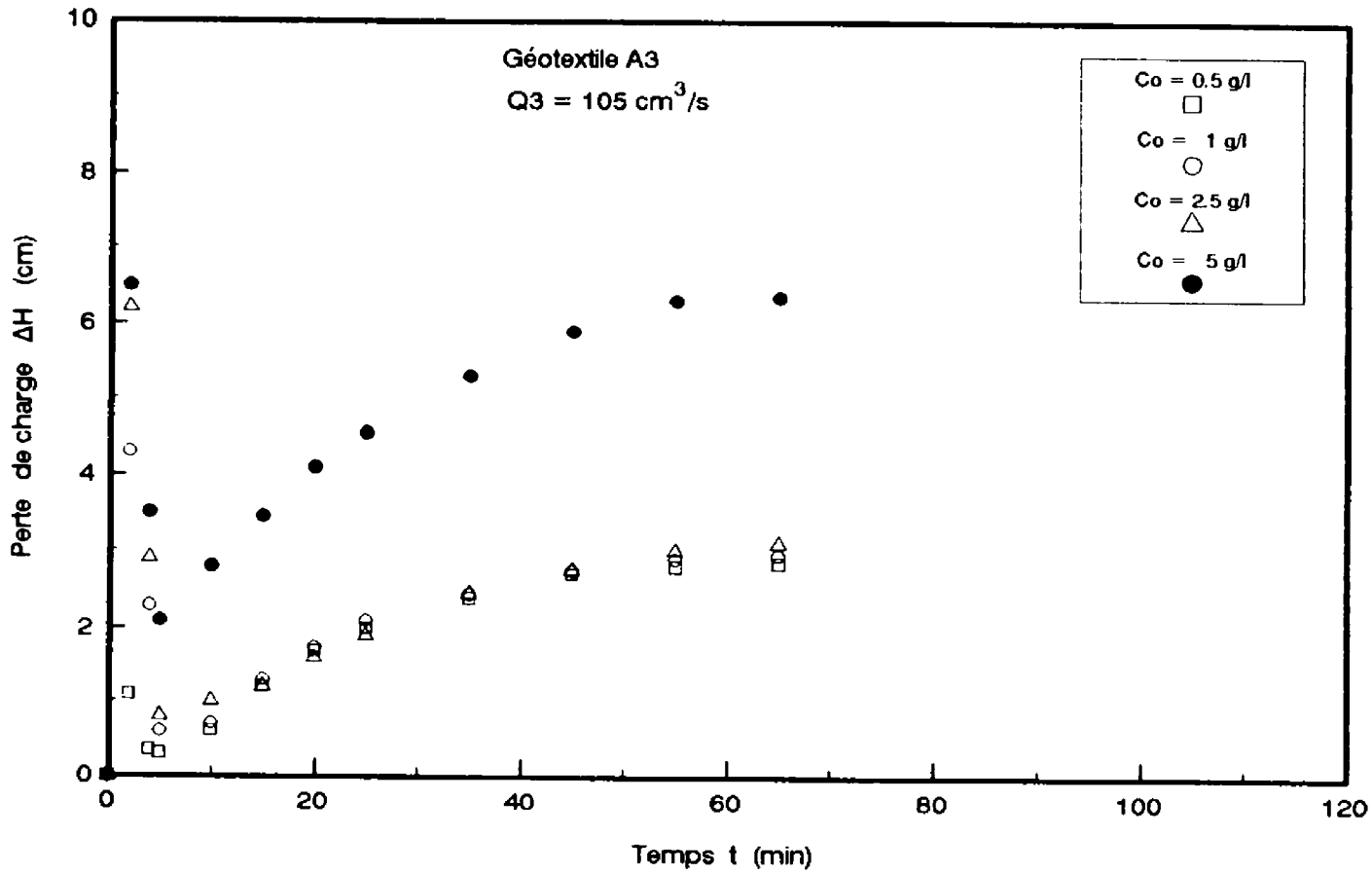
Annexe III.2 Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



Annexe III.3 Influence de l'ouverture de filtration sur les pertes de charge, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



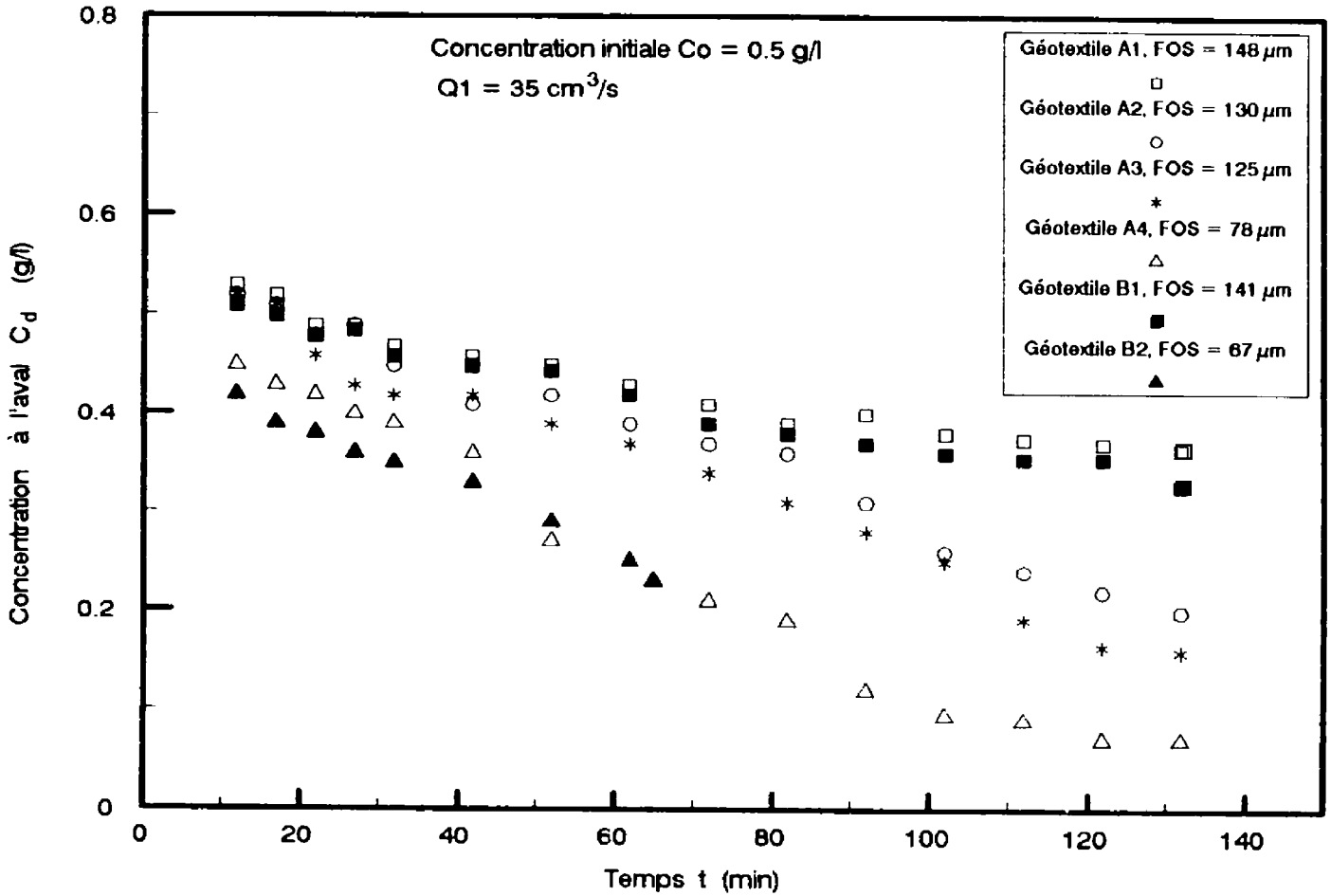
Annexe III.4 Influence de la concentration initiale Co sur les pertes de charge, géotextile A3, Q2 = 70 cm^3/s



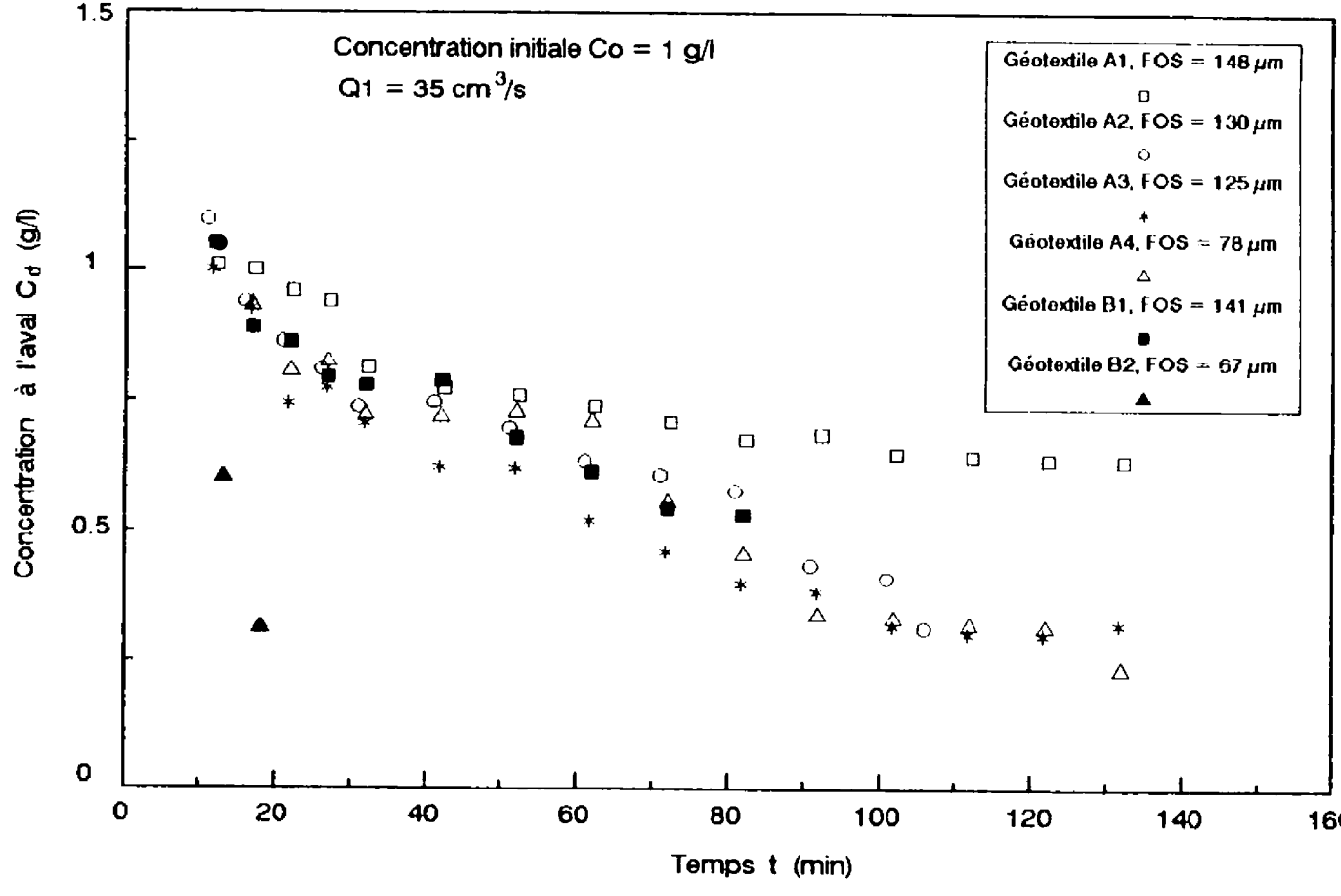
Annexe III.5 Influence de la concentration initiale Co sur les pertes de charge, géotextile A3, Q3 = 105 cm^3/s

ANNEXE IV

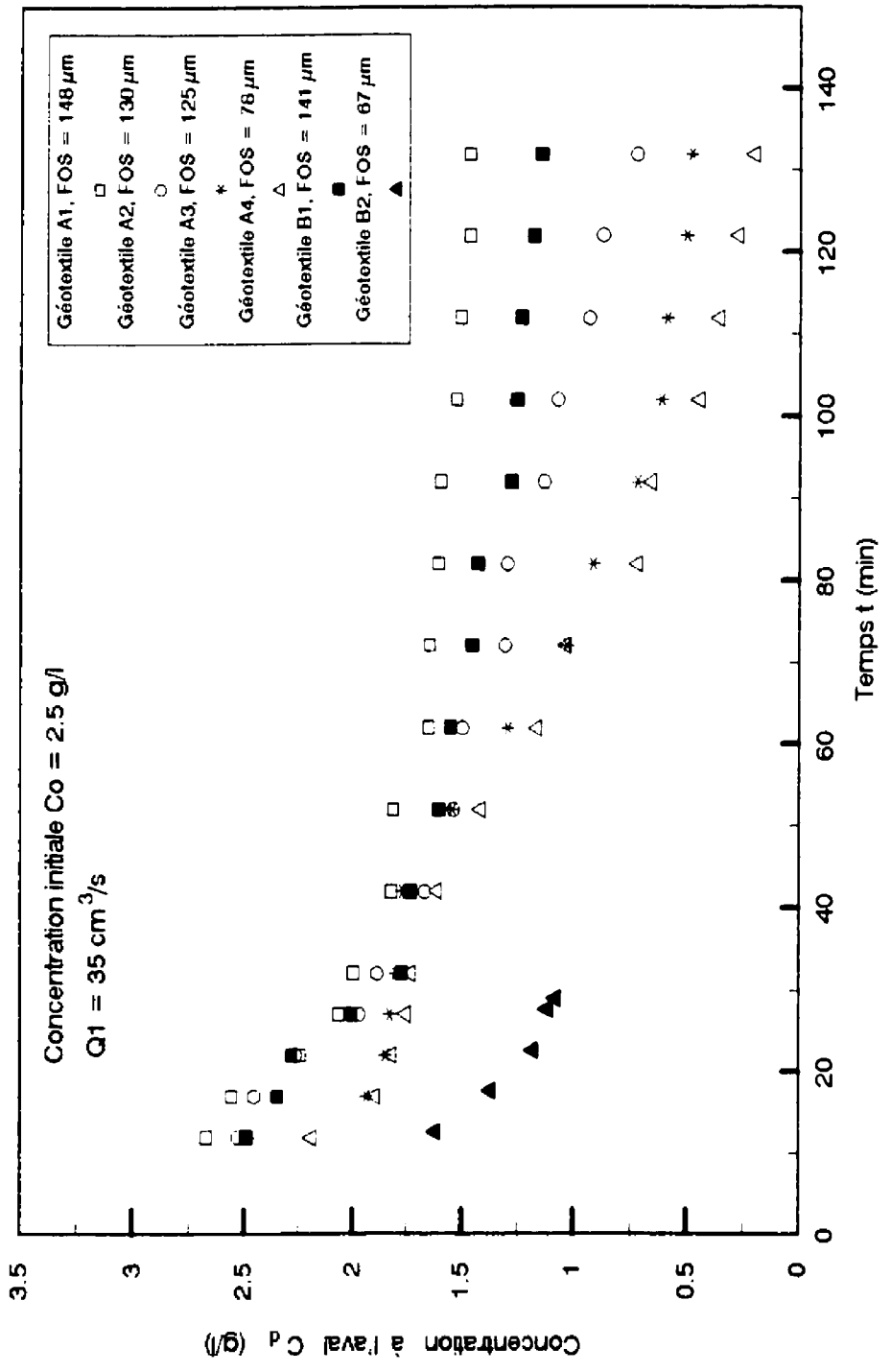
VARIATION DES CONCENTRATIONS C_i EN FONCTION DU TEMPS



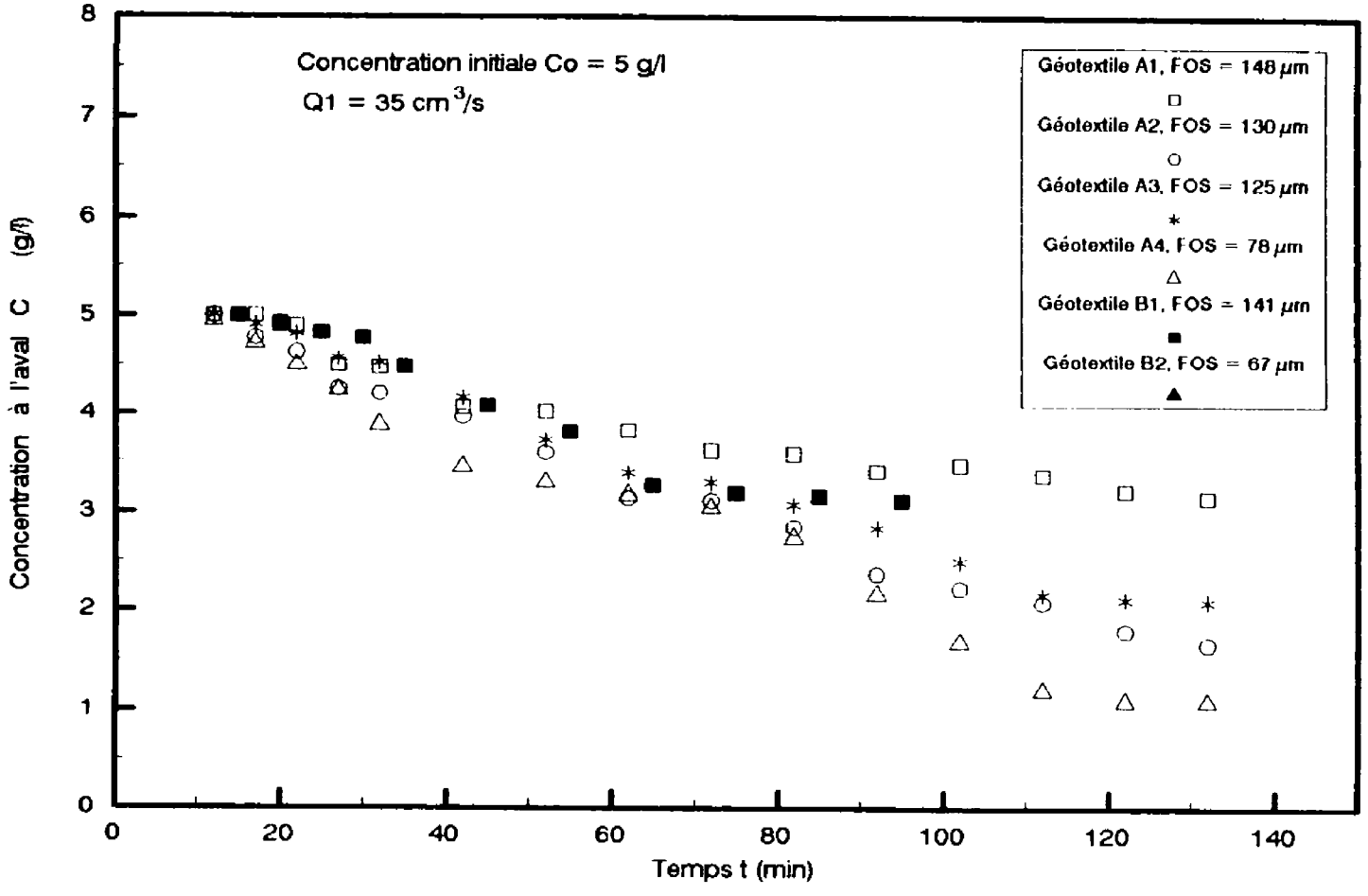
Annexe IV.1 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextiles A et B, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



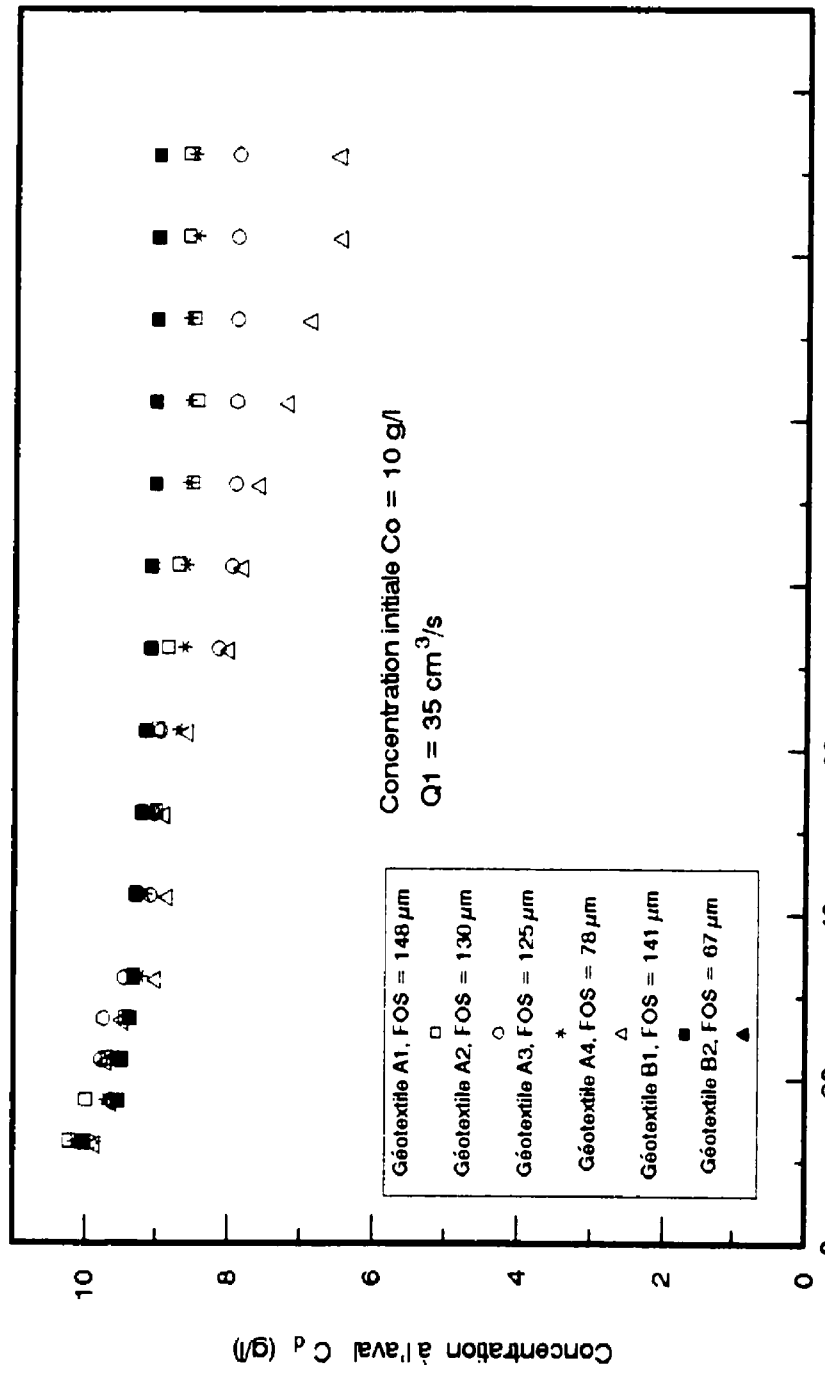
Annexe IV.2 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextiles A et B, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



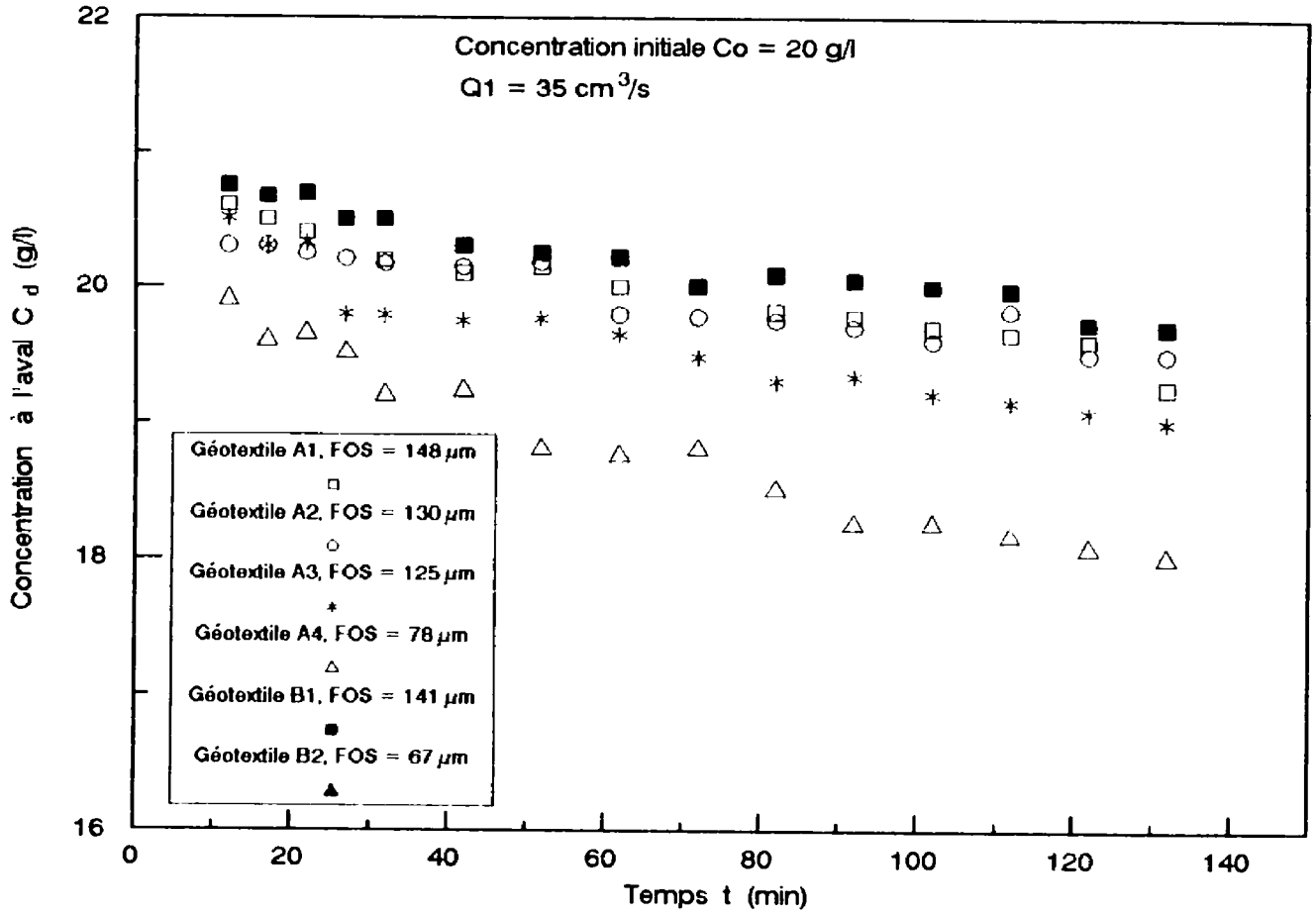
Annexe IV.3 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextiles A et B, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



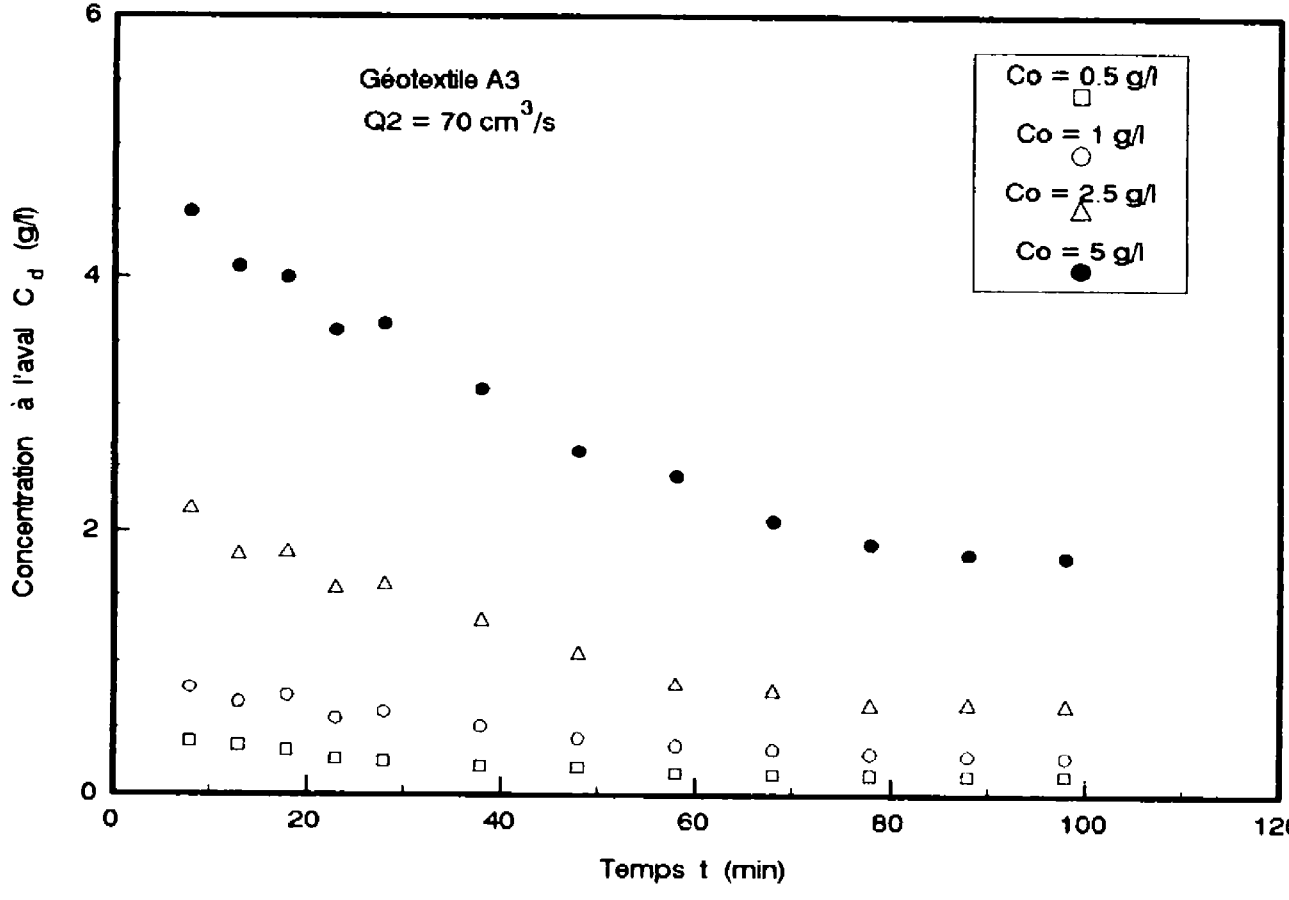
Annexe IV.4 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextiles A et B, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



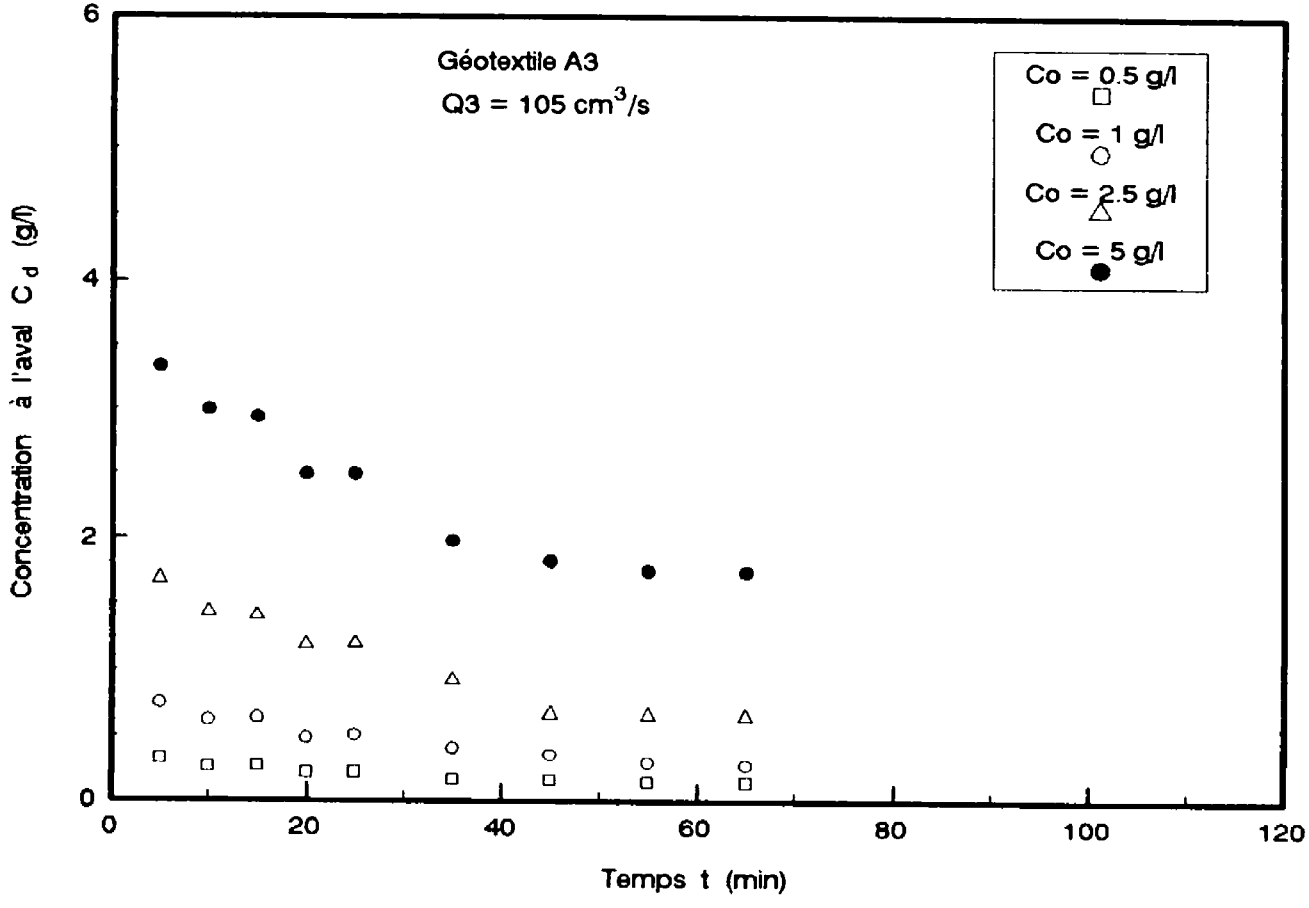
Annexe IV.5 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextiles A et B, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



Annexe IV.6 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextiles A et B, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



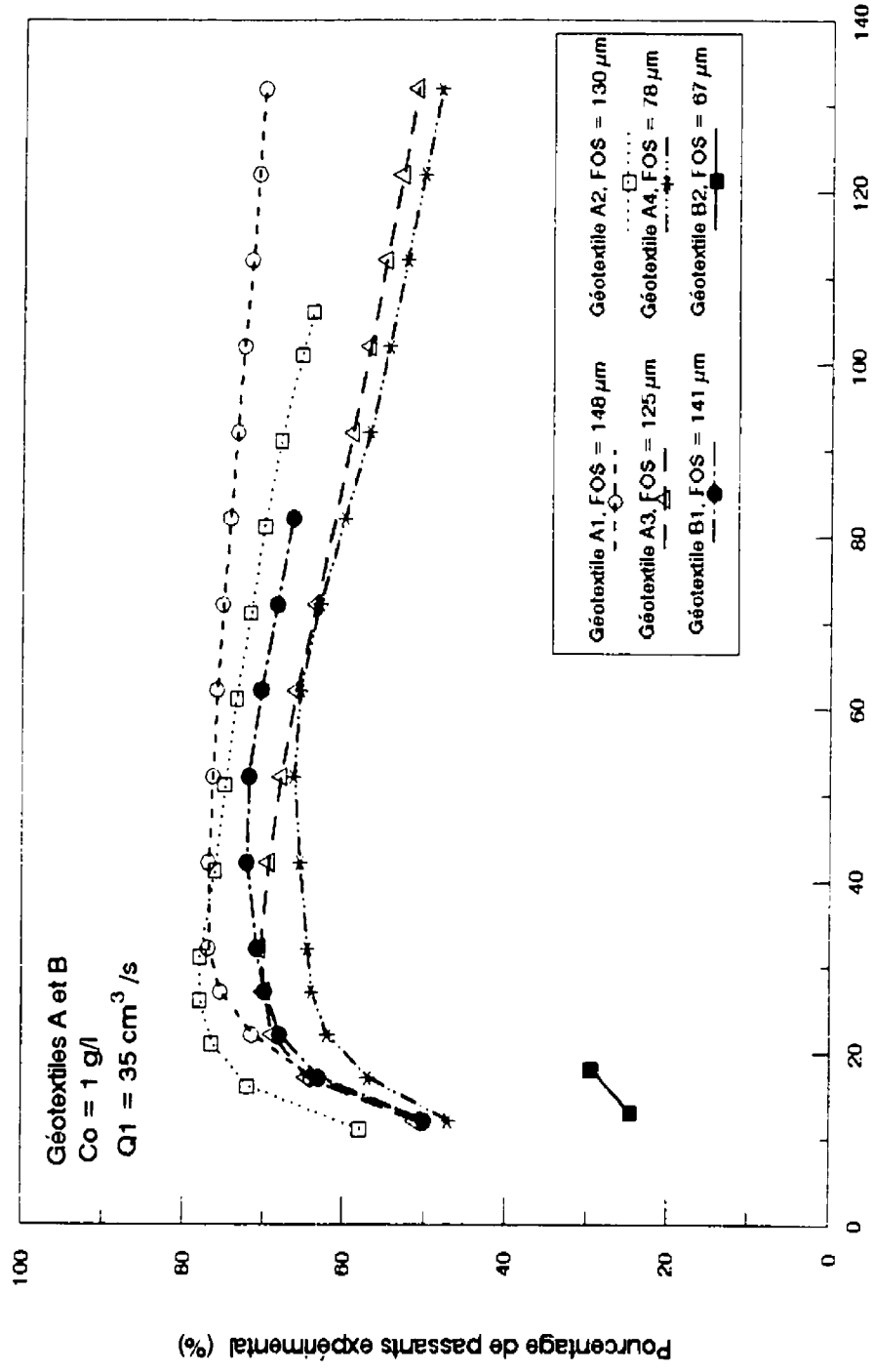
Annexe IV.7 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextile A3, Q2 = 70 cm^3/s



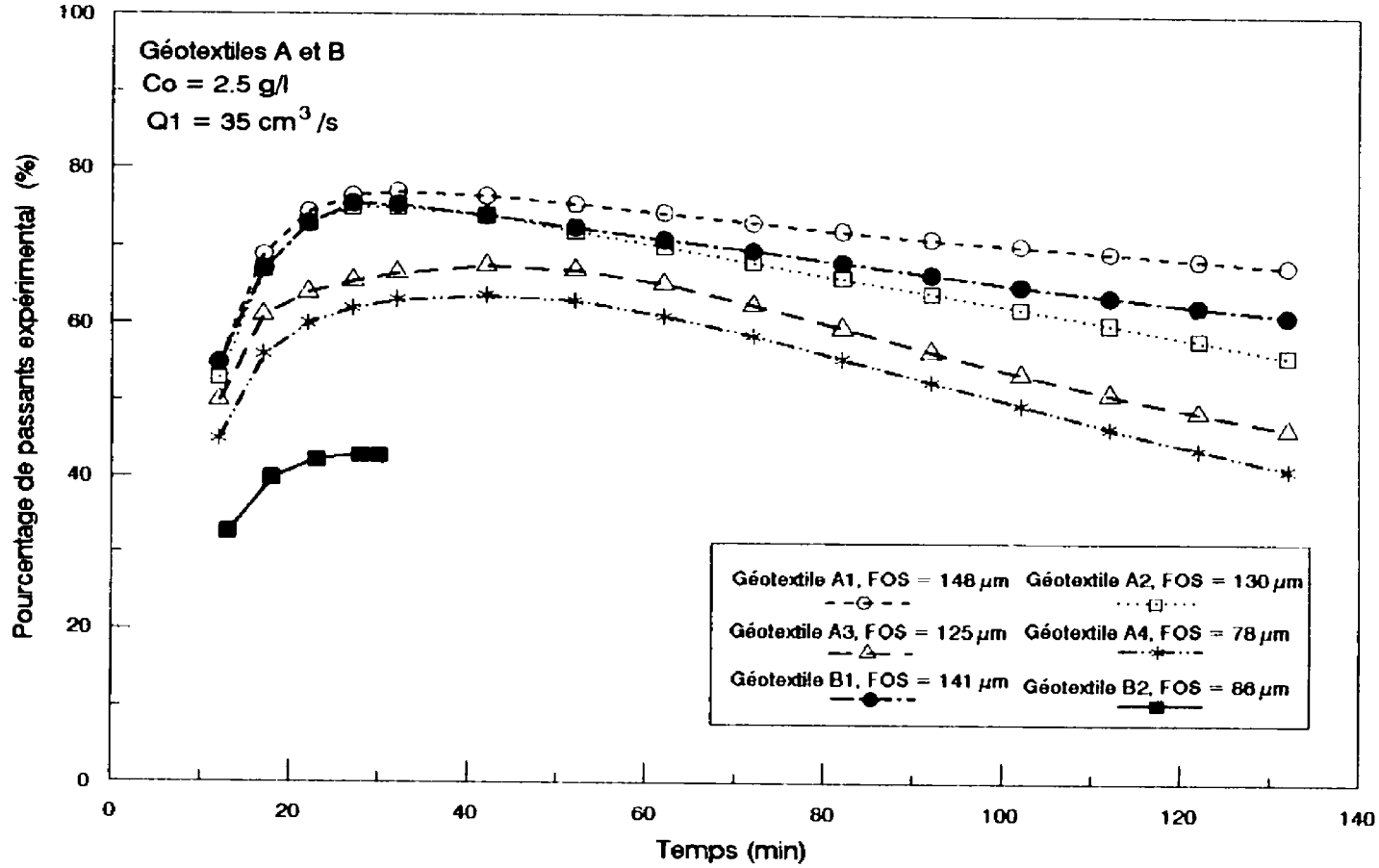
Annexe IV.8 Concentrations Cd des passants mesurées en fonction du temps, géotextile A3, Q3 = 105 cm^3/s

ANNEXE V

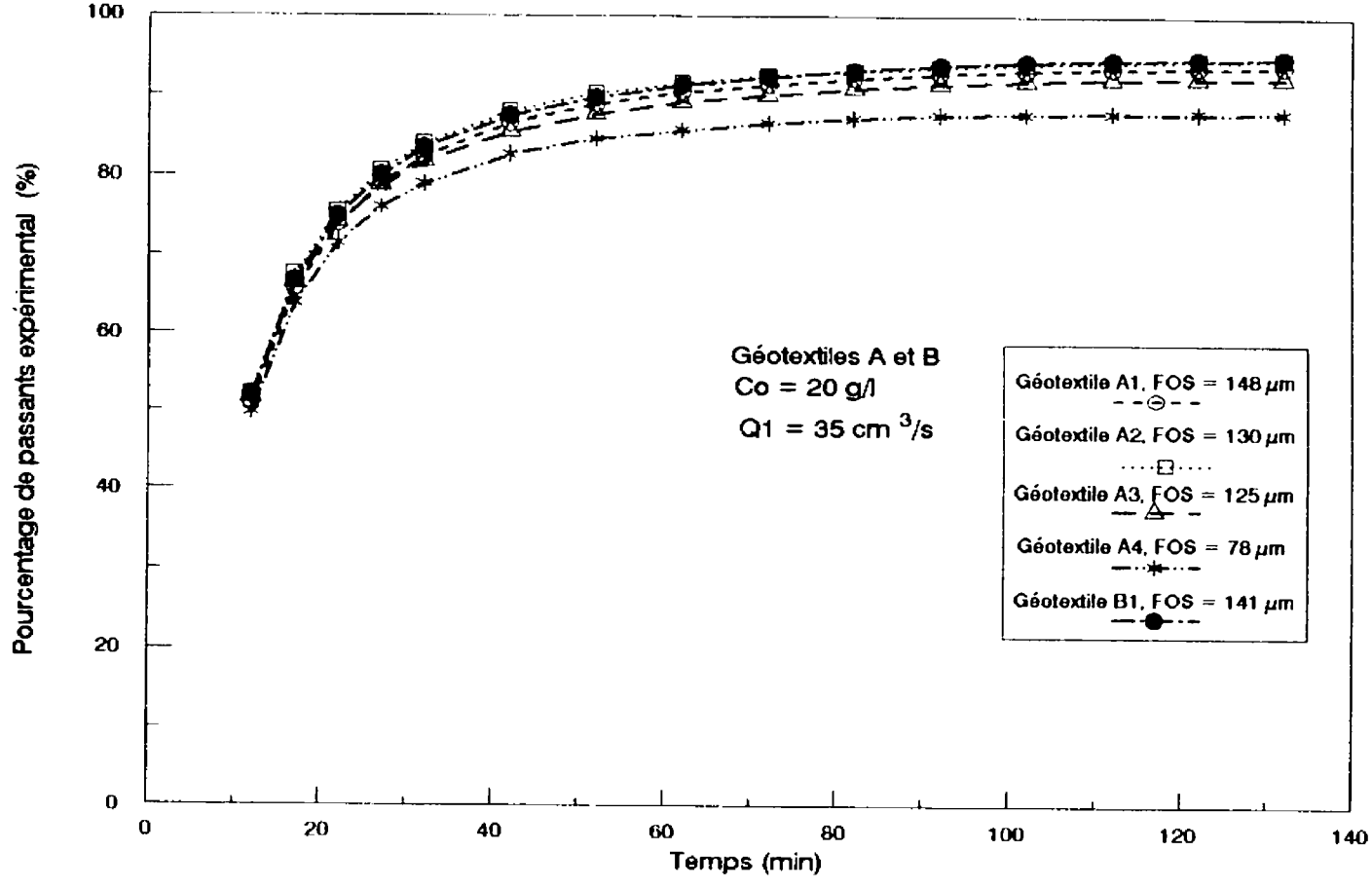
VARIATION DES POURCENTAGES DE PASSANTS EN FONCTION DU TEMPS



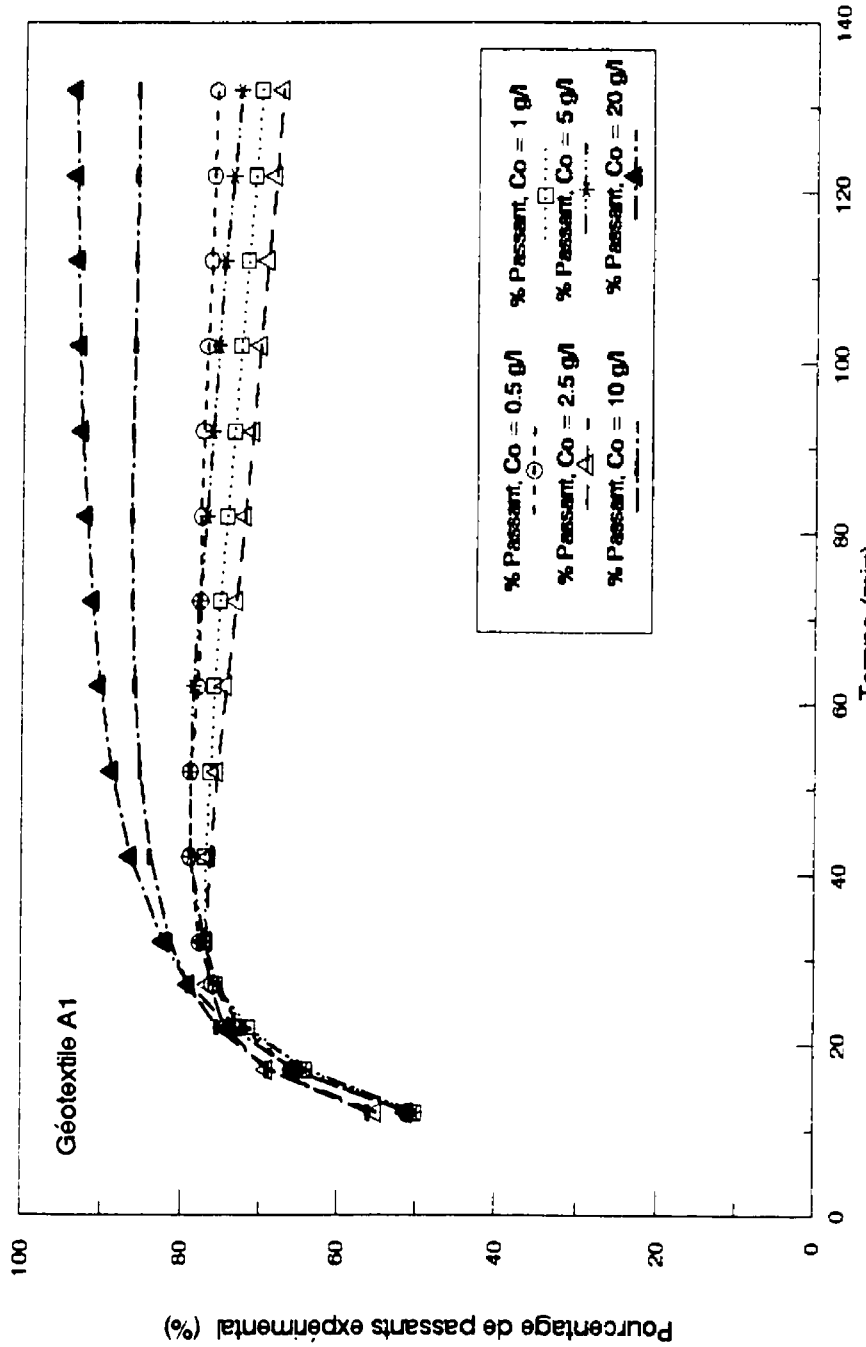
Annexe V.1 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm ^{3}/s



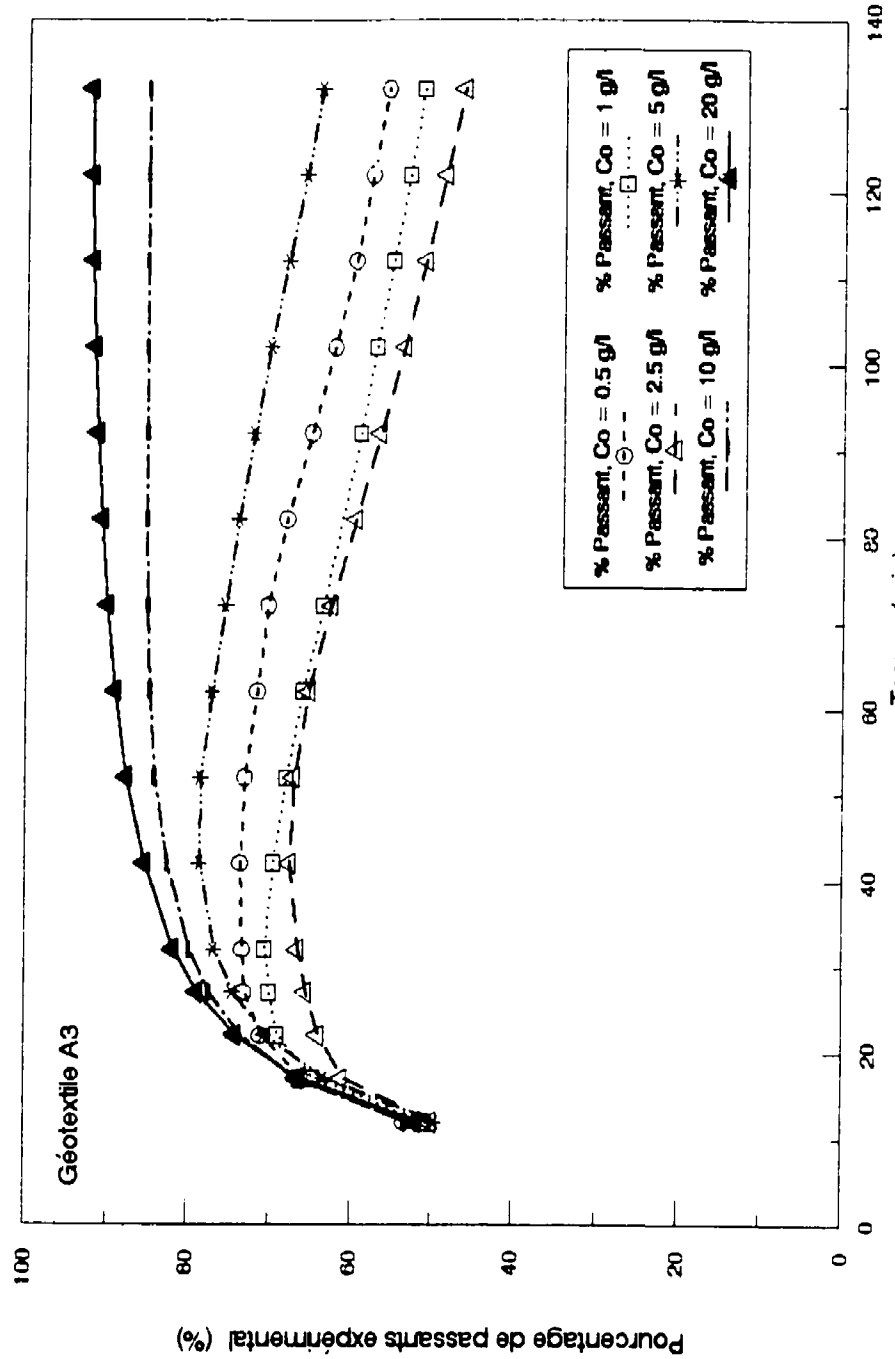
Annexe V.2 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm^3/s



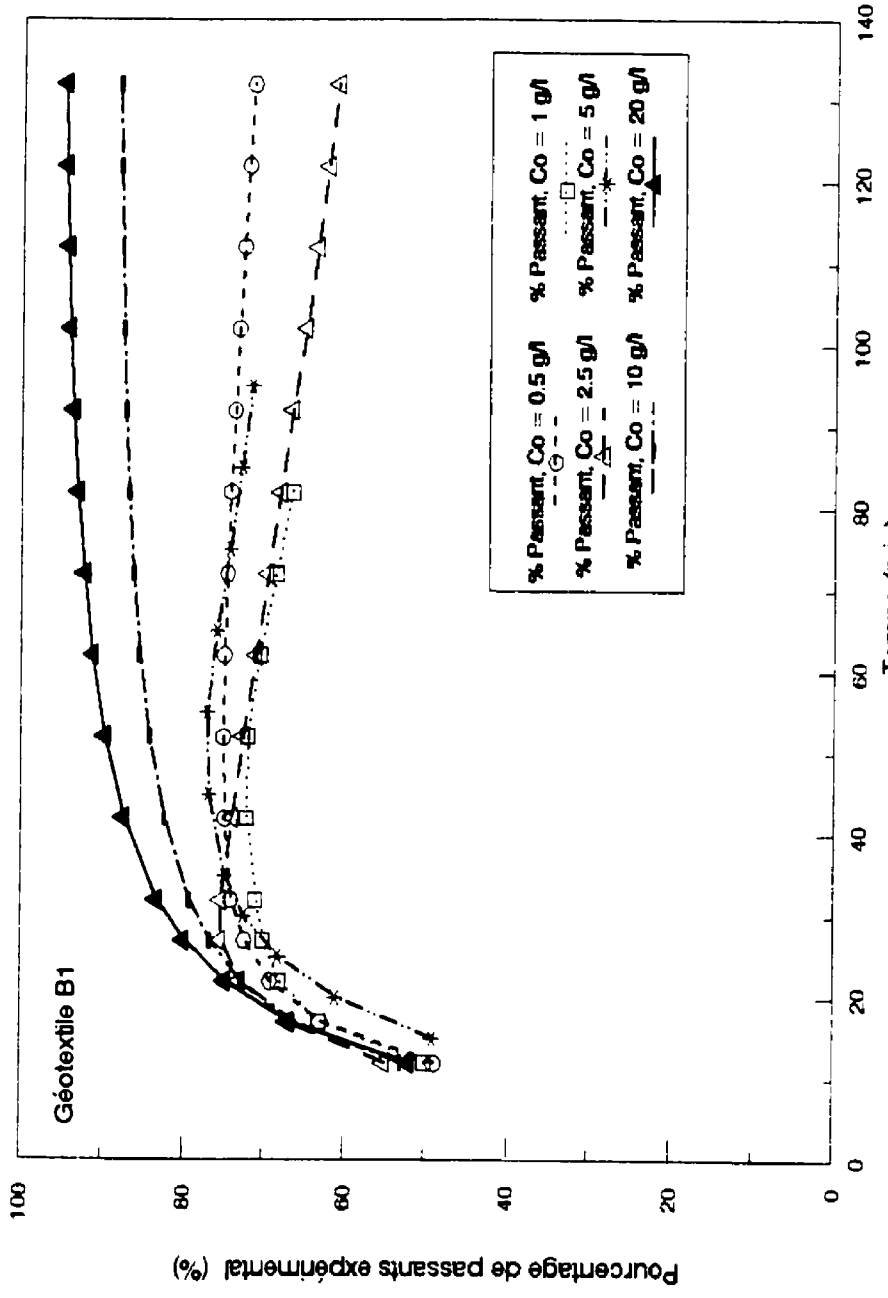
Annexe V.3 Influence de l'ouverture de filtration sur les passants des géotextiles A et B, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm ^{3}/s



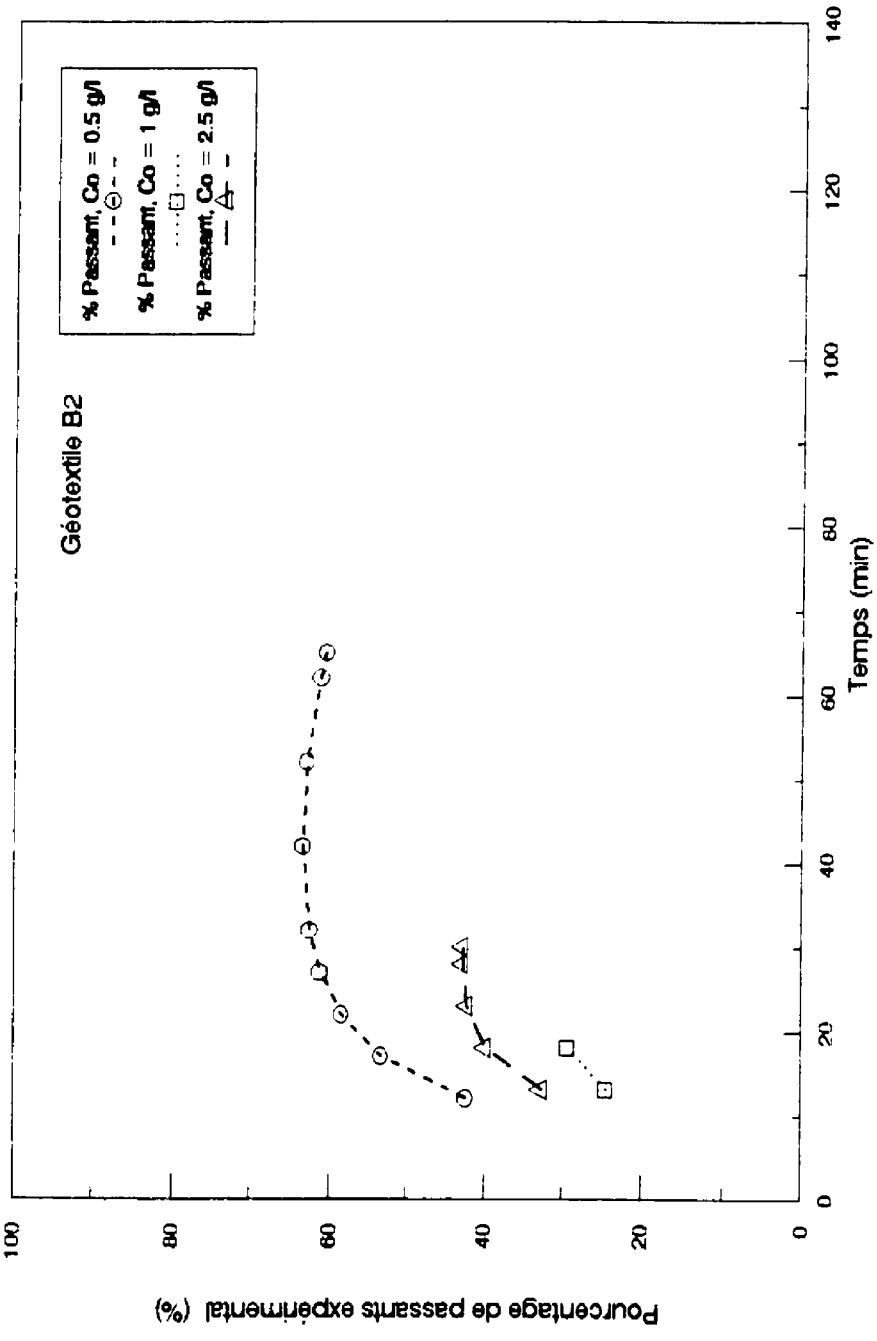
Annexe V.4 Influence de la concentration initiale Co sur les passants,
Géotextile A1, Q1 = 35 cm^3/s



Annexe V.5 Influence de la concentration initiale Co sur les passants, Géotextile A3, Q1 = 35 cm^3/s



Annexe V.6 Influence de la concentration initiale Co sur les passants,
Géotextile B1, Q1 = 35 cm^3/s



Annexe V.7 Influence de la concentration initiale Co sur les passants, Géotextile B2, Q1 = 35 cm^3/s

Annexe V.8 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 1 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
E_{mes} (%)	30	36	49	52	34	71*
E_{th} (%)	**28**	**42**	**48**	**58**	**33**	**69**
ΔE/E (%)	7	14	2	10	3	3

*Essai ayant duré 17 min.

Annexe V.9 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
Emes (%)	32	44	54	59	34	57*
E_{th} (%)	**28**	**42**	**48**	**58**	**33**	**69**
ΔE/E (%)	13	5	11	2	3	17

* Essai ayant duré 30 min.

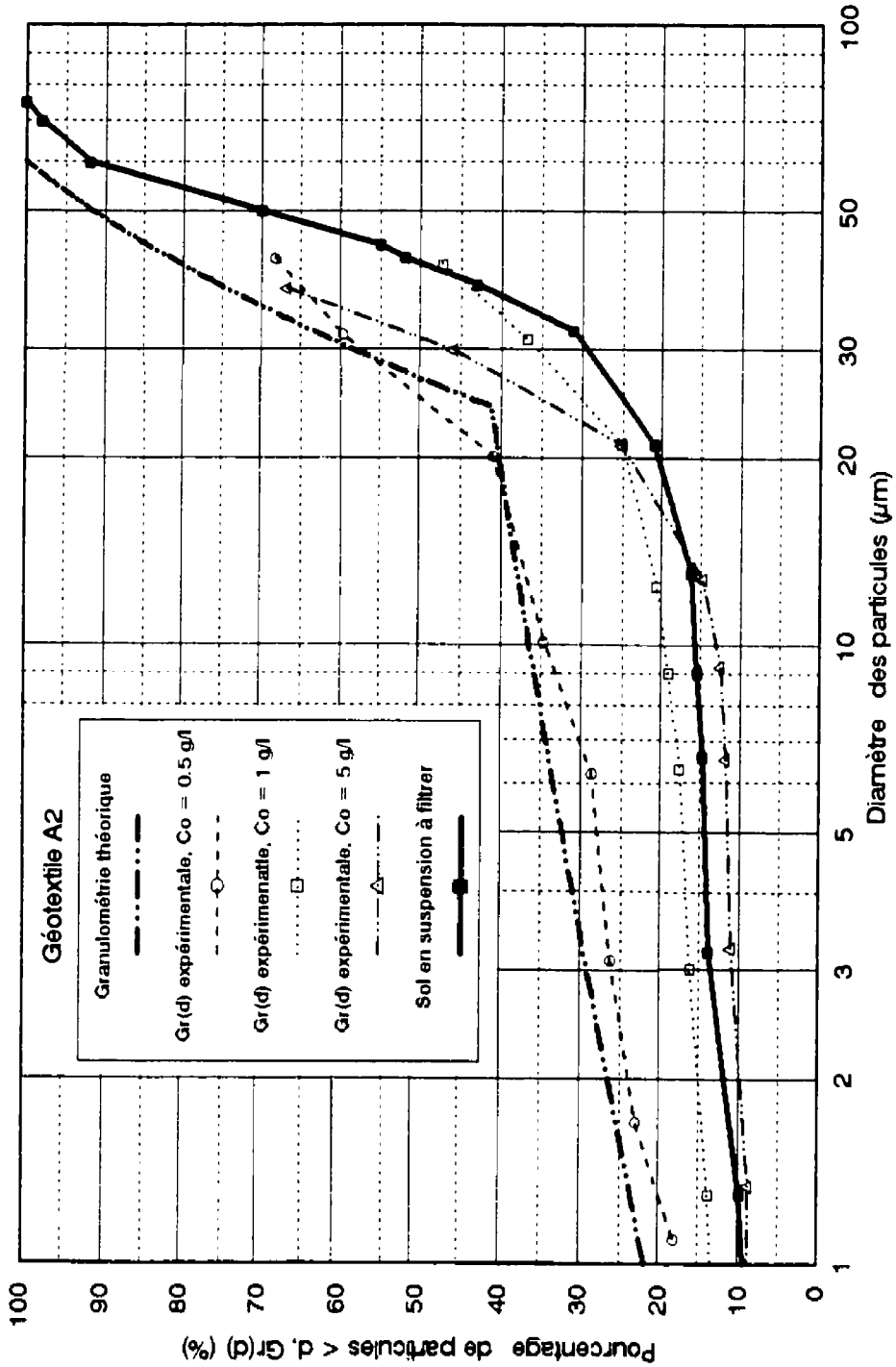
Annexe V.10 Comparaison entre les efficacités théoriques et expérimentales des géotextiles étudiés, C_0 = 20 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	A1	A2	A3	A4	B1	B2
E_{mes} (%)	6	5	8	12	5	*
E_{th} (%)	**28**	**42**	**48**	**58**	**33**	**69**
ΔE/E (%)	79	88	83	79	85	-

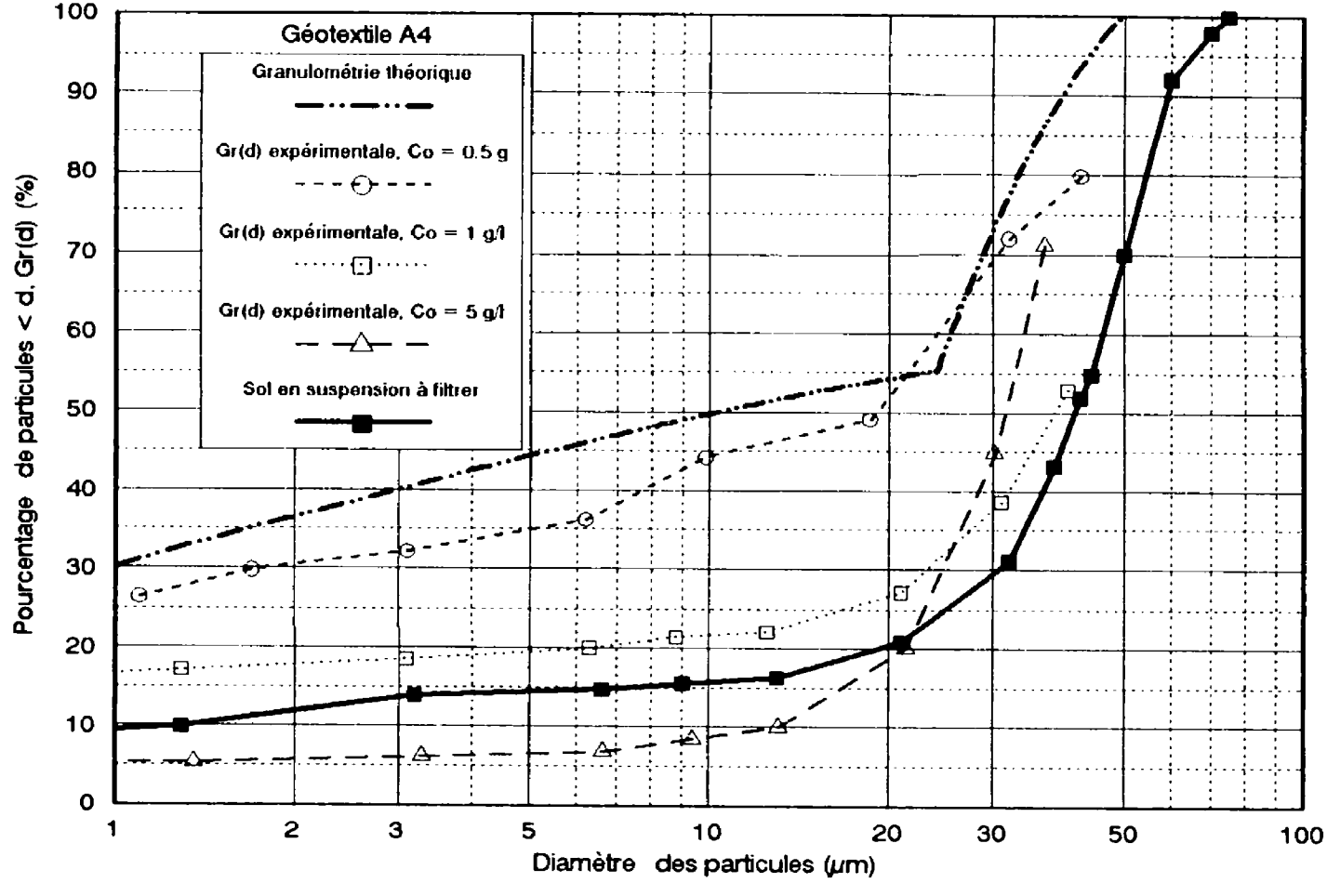
* Colmatage du géotextile.

ANNEXE VI

GRANULOMÉTRIES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALES



Annexe VI.1 Comparaison entre les granulométries théoriques et expérimentales, géotextile A2, Q1 = 35 cm^3/s



Annexe VI.2 Comparaison entre les granulométries théoriques et expérimentales, géotextile A4, Q1 = 35 cm^3/s

ANNEXE VII

MESURES DES DEGRÉS DE COLMATAGE DES GÉOTEXTILES ÉTUDIÉS

Tableau VII.1 Colmatage des géotextiles après essai de filtration, Co = 0.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	N° Section	Tgc (mm)	Tg (mm)	Tc (mm)	Sections (cm2)	Vc (cm3)	Vsc (cm3)	Msc (g)	Mf (g)	Mt (g)	Msf (g)	Vsf (cm3)	Vf (cm3)	n	nf	cn/n (%)
A1	3	1.37	1.30	0.07	16	0.112	0.056	0.15	0.2	0.6	0.25	0.096	2.08	0.932	0.886	4.93
	2	1.38	1.30	0.08	16	0.128	0.064	0.17	0.2	0.65	0.28	0.108	2.08	0.932	0.88	5.57
	1	1.38	1.30	0.08	16	0.128	0.064	0.17	0.2	0.71	0.34	0.13	2.08	0.932	0.87	6.62
A2	3	2.02	1.90	0.12	16	0.192	0.096	0.252	0.32	1	0.43	0.16	3.04	0.923	0.87	5.76
	2	2.02	1.90	0.12	20.25	0.243	0.121	0.32	0.41	1.31	0.58	0.22	3.85	0.923	0.867	6.07
	1	2.03	1.90	0.13	20.25	0.263	0.131	0.35	0.41	1.42	0.66	0.25	3.85	0.923	0.859	6.97
A3	3	3.15	3.20	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	0.931		
	2	3.39	3.20	0.19	16	0.304	0.150	0.4	0.48	1.72	0.84	0.32	5.12	0.931	0.867	6.67
	1	3.45	3.20	0.22	16	0.352	0.176	0.46	0.48	1.83	0.89	0.34	5.12	0.931	0.865	7.14
A4	3	4.30	4.10	0.20	16	0.320	0.160	0.42	0.66	2.2	1.12	0.42	6.56	0.927	0.862	6.99
	2	4.31	4.10	0.21	16	0.336	0.168	0.44	0.66	2.37	1.27	0.48	6.56	0.927	0.853	7.94
	1	4.06	4.10	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	0.927	-	-
B1	3	1.34	1.40	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	1.50	1.40	0.10	16	0.160	0.080	0.21	0.21	0.76	0.34	0.13	2.24	0.92	0.862	6.31
	1	1.52	1.40	0.12	19.36	0.232	0.120	0.31	0.24	1	0.45	0.17	2.71	0.92	0.856	6.92
B2	3	3.30	3.50	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	0.891	-	-
	2	3.56	3.50	0.06	25	0.150	0.075	0.2	1.1	12.29	10.99	4.18	11.46	0.891	0.526	41
	1	3.40	3.50	-	25	-	-	-	1.1	11.98	-	-	-	0.891	-	-

Tableau VII.2 Colmatage des géotextiles après essai de filtration, Co = 1 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	N° Section	Tgc (mm)	Tg (mm)	Tc (mm)	Sections (cm2)	Vc (cm3)	Vsc (cm3)	Msc (g)	Mf (g)	Mt (g)	Msf (g)	Vsf (cm3)	Vf (cm3)	n	nf	Δn/n (%)
A1	3	1.4	1.3	0.1	16	0.16	0.08	0.21	0.2	0.68	0.27	0.1	2.08	0.932	0.883	5.25
	2	1.41	1.3	0.11	16	0.176	0.088	0.23	0.2	0.76	0.33	0.125	2.08	0.932	0.872	6.43
	1	1.42	1.3	0.12	19.36	0.23	0.115	0.3	0.2	0.95	0.45	0.17	2.51	0.932	0.864	7.3
A2	3	2.68	1.9	0.78	36	2.81	1.405	3.69	0.72	5.28	0.87	0.33	6.84	0.923	0.875	5.23
	2	2.69	1.9	0.89	36	3.2	1.6	4.21	0.72	5.98	1.05	0.4	6.84	0.923	0.865	6.27
	1	1.8	1.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A3	3	3.46	3.2	0.26	16	0.416	0.208	0.55	0.48	1.9	0.87	0.33	5.12	0.931	0.867	6.93
	2	3.46	3.2	0.26	16	0.416	0.208	0.55	0.48	1.94	0.91	0.346	0.512	0.931	0.864	7.21
	1	3.52	3.2	0.32	20.25	0.648	0.324	0.85	0.61	2.9	1.44	0.55	6.48	0.931	0.846	9.17
A4	3	4.05	4.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.927	-	-
	2	4.41	4.1	0.31	16	0.496	0.248	0.65	0.66	2.63	1.32	0.5	6.56	0.927	0.85	8.27
	1	4.46	4.1	0.36	25	0.9	0.45	1.18	1.04	4.66	2.44	0.93	10.25	0.927	0.836	9.78
B1	3	1.93	1.4	0.53	25	1.325	0.663	1.74	0.32	2.7	0.64	0.24	3.5	0.92	0.85	7.62
	2	1.94	1.4	0.54	36	1.944	0.972	2.55	0.46	4.01	1	0.38	5.04	0.92	0.844	8.25
	1	1.3	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.92	-	-
B2	3	3.05	3.5	0.15	25	0.375	0.187	0.49	1.1	7.69	6.1	2.32	8.75	0.891	0.626	29.74
	2	3.65	3.5	0.15	25	0.375	0.187	0.49	1.1	8.19	6.6	2.51	8.75	0.891	32.21	
	1	3.4	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.891	-	

Tableau VII.3 Colmatage des géotextiles après essai de filtration, Co = 2.5 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	N° Section	Tgc (mm)	Tg (mm)	Tc (mm)	Sections (cm2)	Vc (cm3)	Vsc (cm3)	Msc (g)	Mf (g)	Ml (g)	Msf (g)	Vsf (cm3)	Vf (cm3)	n	nf	(n-nf)/n (%)
A1	3	1.51	1.3	0.21	12.25	0.257	0.128	0.34	0.15	0.76	0.27	0.1	1.59	0.932	0.866	7.08
	2	1.51	1.3	0.21	16	0.336	0.168	0.44	0.2	1.03	0.37	0.14	2.08	0.932	0.866	7.08
	1	1.51	1.3	0.21	16	0.336	0.168	0.44	0.2	1.12	0.46	0.17	2.08	0.932	0.848	9.02
A2	3	2.12	1.9	0.22	16	0.352	0.176	0.46	0.32	1.29	0.51	0.19	3.04	0.923	0.859	6.98
	2	2.14	1.9	0.24	16	0.384	0.192	0.5	0.32	1.4	0.58	0.22	3.04	0.923	0.851	7.81
	1	1.8	1.9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.923	–	
A3	3	3.46	3.2	0.26	16	0.416	0.208	0.55	0.45	1.96	0.96	0.365	5.12	0.931	0.86	7.62
	2	3.49	3.2	0.29	16	0.464	0.232	0.61	0.45	2.25	1.19	0.45	5.12	0.931	0.843	9.49
	1	3.51	3.2	0.31	22.09	12.95	0.647	1.7	0.67	4.46	2.09	0.79	7.07	0.931	0.819	12.06
A4	3	4	4.1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.927	–	–
	2	5.05	4.1	0.95	16	1.52	0.76	2	0.66	4.05	1.39	0.529	6.56	0.927	0.846	8.7
	1	5.5	4.1	1.4	16	2.24	1.12	2.94	0.66	5.11	1.51	0.574	6.56	0.927	0.839	9.46
B1	3	1.65	1.4	0.25	16	0.4	0.2	0.53	0.21	1.17	0.43	0.164	2.24	0.92	0.847	7.94
	2	1.65	1.4	0.25	16	0.4	0.2	0.53	0.21	1.19	0.45	0.171	2.24	0.92	0.843	8.33
	1	1.3	1.4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.92	–	–
B2	3	3.69	3.5	0.19	36	0.684	0.342	0.9	1.57	11.68	9.21	3.5	12.6	0.891	0.613	31.19
	2	3.69	3.5	0.19	36	0.684	0.342	0.9	1.57	13.17	10.7	4.07	12.6	0.891	0.568	36.25
	1	3.68	3.5	0.18	36	0.648	0.324	0.85	1.57	14.01	11.59	4.41	12.6	0.891	0.54	39.34

Tableau VII.4 Colmatage des géotextiles après essai de filtration, Co = 5 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	N° Section	Tgc (mm)	Tg (mm)	Tc (mm)	Sections (cm2)	Vc (cm3)	Vsc (cm3)	Msc (g)	Mf (g)	Mf (g)	Msf (g)	Vsf (cm3)	Vf (cm3)	n	nf	Δn/n (%)
A1	3	2.4	1.3	1.1	19.63	2.16	1.08	2.84	0.24	2.47	–	–	2.55	0.932	–	–
	2	2.26	1.3	0.96	19.63	1.88	0.94	2.47	0.24	3.08	0.37	0.14	2.55	0.932	0.877	5.9
	1	3.41	1.3	2.11	19.63	4.14	2.07	5.44	0.24	3.17	–	–	2.55	0.932	–	
A2	3	2.82	1.9	0.92	8.14	0.75	0.375	0.98	0.16	1.32	0.18	0.068	1.546	0.923	0.879	4.8
	2	2.87	1.9	0.97	19.63	1.9	0.95	2.5	0.39	3.36	0.47	0.18	3.73	0.923	0.875	5.2
	1	2.84	1.9	0.94	19.63	1.84	0.92	2.41	0.39	3.89	1.12	0.43	3.73	0.923	0.808	12
A3	3	3.83	3.2	0.63	8.14	0.51	0.255	0.67	0.25	1.27	0.35	0.133	2.6	0.931	0.88	5.5
	2	3.9	3.2	0.7	19.63	1.37	0.675	1.77	0.59	4.5	2.14	0.81	6.28	0.931	0.802	13.9
	1	4.29	3.2	1.09	19.63	2.14	1.07	2.81	0.59	6.09	2.69	1.025	6.28	0.931	0.769	17.4
A4	3	4.85	4.1	0.75	19.63	1.47	0.735	1.93	0.81	4.8	2.06	0.783	8.04	0.927	0.829	10.5
	2	5.45	4.1	1.35	19.63	2.65	1.325	3.48	0.81	6.05	1.76	0.67	8.04	0.927	0.843	9
	1	5.42	4.1	1.32	19.63	2.59	1.295	3.4	0.81	5.91	1.7	0.646	8.04	0.927	0.846	8.7
B1	3	1.68	1.4	0.28	19.63	0.55	0.275	0.72	0.25	1.66	0.69	0.262	2.74	0.92	0.824	10.4
	2	2.08	1.4	0.68	19.63	1.33	0.665	1.75	0.25	2.61	0.61	0.232	2.74	0.92	0.835	9.2
	1	2.48	1.4	1.08	19.63	2.12	1.06	2.79	0.25	3.88	0.84	0.32	2.74	0.92	0.803	12.7
B2	3	3.2	3.5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.891	–	–
	2	3.34	3.5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.891	–	
	1	3.7	3.5	0.2	19.63	0.39	0.195	0.51	0.86	3.64	2.27	0.863	6.87	0.891	14.1	

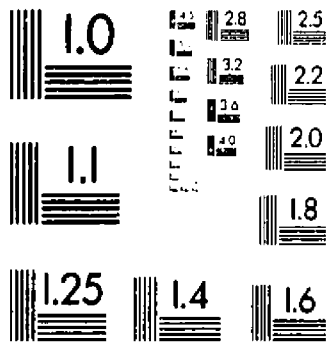
Tableau VII.5 Colmatage des géotextiles après essai de filtration, Co = 10 g/l, Q1 = 35 cm³/s

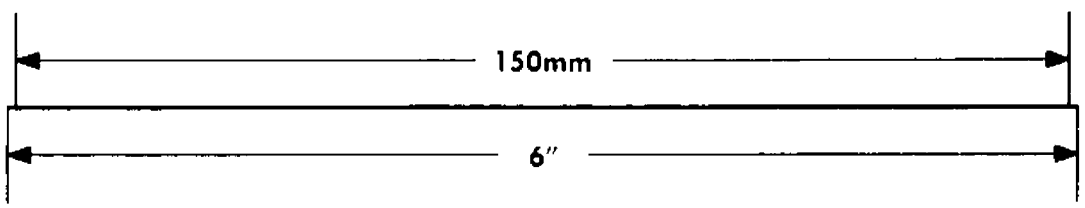
Géotextiles	N° Section	Tgc (mm)	Tg (mm)	Tc (mm)	Sections (cm2)	Vc (cm3)	Vsc (cm3)	Msc (g)	Mf (g)	Mt (g)	Mst (g)	Vst (cm3)	Vf (cm3)	n	nf	Δn/n (%)
A1	3	1.53	1.3	0.23	16	0.37	0.184	0.48	0.2	2.16	1.48	0.56	2.08	0.932	0.662	29
	2	1.61	0.31	0.31	16	0.496	0.248	0.65	0.2	2.43	1.58	0.6	2.08	0.932	31	5.9
	1	1.2	1.3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.932	–	–
A2	3	2.82	1.9	0.92	8.14	0.75	0.375	0.98	0.16	1.32	0.18	0.068	1.546	0.923	0.879	4.8
	2	2.87	1.9	0.97	19.63	1.9	0.95	2.5	0.39	3.36	0.47	0.18	3.73	0.923	0.875	5.2
	1	2.84	1.9	0.94	19.63	1.84	0.92	2.41	0.39	3.89	1.12	0.43	3.73	0.923	0.808	12
A3	3	3.83	3.2	0.63	8.14	0.51	0.255	0.67	0.25	1.27	0.35	0.133	2.6	0.931	0.88	5.5
	2	3.9	3.2	0.7	19.63	1.37	0.675	1.77	0.59	4.5	2.14	0.81	6.28	0.931	0.802	13.9
	1	4.29	3.2	1.09	19.63	2.14	1.07	2.81	0.59	6.09	2.69	1.025	6.28	0.931	0.769	17.4
A4	3	4.85	4.1	0.75	19.63	1.47	0.735	1.93	0.81	4.8	2.06	0.783	8.04	0.927	0.829	10.5
	2	5.45	4.1	1.35	19.63	2.65	1.325	3.48	0.81	6.05	1.76	0.67	8.04	0.927	0.843	9
	1	5.42	4.1	1.32	19.63	2.59	1.295	3.4	0.81	5.91	1.7	0.646	8.04	0.927	0.846	8.7
B1	3	1.68	1.4	0.28	19.63	0.55	0.275	0.72	0.25	1.66	0.69	0.262	2.74	0.92	0.824	10.4
	2	2.08	1.4	0.68	19.63	1.33	0.665	1.75	0.25	2.61	0.61	0.232	2.74	0.92	0.835	9.2
	1	2.48	1.4	1.08	19.63	2.12	1.06	2.79	0.25	3.88	0.84	0.32	2.74	0.92	0.803	12.7
B2	3	3.2	3.5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.891	–	–
	2	3.34	3.5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.891	–	
	1	3.7	3.5	0.2	19.63	0.39	0.195	0.51	0.86	3.64	2.27	0.863	6.87	0.891	14.1	

Tableau VII.6 Colmatage des géotextiles après essai de filtration, Co = 20 g/l, Q1 = 35 cm³/s

Géotextiles	N° Section	Tgc (mm)	Tg (mm)	Tc (mm)	Sections (cm2)	Vc (cm3)	Vsc (cm3)	Msc (g)	Mf (g)	Mt (g)	Msf (g)	Vsf (cm3)	Vf (cm3)	n	nf	Δn/n (%)
A1	3	1.2	1.3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.932	–	–
	2	1.83	1.3	0.53	16	0.848	0.424	1.12	0.2	3.08	1.76	0.67	2.08	0.932	0.294	34.61
	1	1.89	13	0.59	25	1.475	0.74	1.94	0.305	5.13	2.89	1.1	3.25	0.932	0.594	36.21
A2	3	2.59	1.9	0.69	16	1.104	0.562	1.45	0.32	4.15	2.38	0.9	3.04	0.923	0.626	32.2
	2	2.66	1.9	0.76	25	1.9	0.95	2.5	0.5	7.04	4.04	1.53	4.75	0.923	0.6	35.02
	1	1.8	1.9	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.923	–	–
A3	3	3.97	3.2	0.77	16	1.232	0.616	1.62	0.48	6.02	3.92	1.49	5.12	0.931	0.64	31.28
	2	4.08	3.2	0.88	25	2.2	1.1	2.89	0.76	10.45	6.76	2.57	8	0.931	0.61	34.5
	1	4.21	3.2	1.01	25	2.52	1.16	3.32	0.76	11.26	7.18	2.73	8	0.931	0.59	36.65
A4	3	4	4.1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.927	–	–
	2	5.03	4.1	0.93	25	2.33	1.16	3.06	1.04	13.15	9.05	3.44	10.25	0.927	0.591	36.22
	1	5.22	4.1	1.12	25	2.8	1.4	3.68	1.04	14.33	9.61	3.65	10.25	0.927	0.57	38.48
B1	3	1.91	1.4	0.51	25	1.28	0.64	1.68	1.34	6.24	3.22	1.22	3.5	0.92	0.57	38.05
	2	1.93	1.4	0.53	25	1.325	0.66	1.74	1.34	6.35	3.27	1.24	3.5	0.92	0.565	38.61
	1	2.01	1.4	0.61	25	1.525	0.76	2	1.34	6.67	3.33	1.27	3.5	0.92	0.558	39.33
B2	3	6.05	3.5	2.55	25	6.38	3.19	8.38	1.09	11.33	1.86	0.71	8.75	0.891	0.81	9.1
	2	6.21	3.5	2.71	25	6.78	3.39	8.91	1.09	11.63	1.63	0.62	8.75	0.891	0.82	7.97
	1	3.4	3.5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0.891	–	–

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