

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Surfaces Interfaces Continentales Hydrologie

Présentée et soutenue par :

Mme MANEL JOUINI

le lundi 9 avril 2018

Titre :

Etude des interactions hydrodynamiques et colmatage dans des milieux très perméables

---

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SDUEE)

Unité de recherche :

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (I.M.F.T.)

Directeur(s) de Thèse :

M. GERALD DEBENEST

MME AMEL SOUALMIA

Rapporteurs :

M. ABDELLATIF OUAHSINE, UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE

M. PATRICE CREUX, UNIVERSITE DE PAU ET DES PAYS DE L ADOUR

Membre(s) du jury :

M. ELIES HAMZA, IRESA, Président

M. GERALD DEBENEST, INP TOULOUSE, Membre

Mme AMEL SOUALMIA, INSTITUT AGRONOMIQUE DE TUNIS, Membre

M. SAMIR ENNOUR, MECATER INGENIERIE, Membre

Je dédie cette thèse à …

- *Ma mère Monjia JOUINI et Mon père Ahmed JOUINI*

Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

- *Ma sœur Maroua, mes frères Khalil et khaled et ma sœur Malak et son mari Mohamed Katib et leurs adorables enfants Najd et Mayar.*

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Malgré la distance, vous êtes toujours dans mon cœur. Je vous remercie pour votre hospitalité sans égal et votre affection si sincère. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Remerciements

C’est très difficile de remercier tout le monde car c’est grâce à l’aide de nombreuses personnes que j’ai pu mener cette thèse à son terme. Je voudrais tout d’abord remercier mes directeurs de thèse pour m’avoir appris à être plus autonome tout au long de ce travail de recherche. Mme Amel SOUALMIA, elle a été toujours présente pour me soutenir, et me conseiller au cours de l’élaboration de cette thèse.

Je tiens à remercier grandement Mr Gerald DEBENEST, sa relecture finale méticuleuse de chacun des chapitres m'a sans aucun doute permis de préciser mon propos. Je lui remercie énormément pour son accueil dans son équipe du groupe des écoulements dans des milieux poreux ‘GEMP’ à l’IMFT, et pour son large esprit de coopération et puis particulièrement pour le suivi de mon travail.

J'adresser également mes remerciements particuliers au Professeur Lucien Masbernat. Les mots sont insuffisants pour le remercier, pour son aide, son humanisme, ses conseils et suggestions scientifiques fertiles.

Je remercie également Mr Abdellatif Ouahsine et Mr Patrice Creux qui m’ont fait l’honneur d’être rapporteurs de ma thèse, ainsi que Mr Samir Ennour qui a accepté d’être examinateur de la thèse et qui nous a donné sa confiance pour la réalisation de ce travail, ses discussions fertiles durant nos réunions étaient de grande aide. Je remercie aussi Mr Denis Dartus, qui m’a aidé de près et de loin par ses conseils et remarques pertinentes le long de la thèse. Je remercie spécialement le Président de l’IRESA, ancien directeur de l’INAT, Professeur Mahmoud Elies Hamza pour ses encouragements, ses qualités humaines, son suivi et ses conseils utiles pour la construction du canal à l’INAT et les expérimentations. J’adresse aussi mes remerciements à Mme Dalila Oueslati pour sa participation à mon comité de suivi de thèse, Je remercie également les responsables et le personnel des deux laboratoires LSTE de l’INAT et GEMP de l’IMFT de m’avoir accueilli sans aucune limite.

Salut aux camarades doctorant(e)s du groupe LSTE (Mabrouka Morri, Héla Romdhane, Slim Houssem Talbi). Un deuxième Salut aux camarades doctorant(e)s et stagiaires du groupe GEMP (Nahla Manssouri, Tawfik Rajeh, Roua Ben Dhia, Hamza Oukili, Marouane Talbi, Gabriella Batalha Ferrera…) qui tous sans exception, m’ont assuré soutien et encouragement.

Je ne peux pas oublier de remercier les membres du personnel de MECATER qui ont contribué de proche ou de loin à l’avancement et au soutien de ce travail, en particulier Monsieur Okba Boughanmi pour le suivi du projet et les réunions utiles.

Je remercie finalement toutes les personnes qui m’ont permis d’aller au bout de ce travail, et je présente mes excuses à toutes celles que j’ai oubliées.

Résumé

La Société le Nickel 'SLN' est l'un des plus grands exploitants de nickel en Nouvelle Calédonie. Le Stockage des déchets de l'exploitation minière sur le site d'exploitation se fait sous forme de tas manufacturés appelés versants. Pour assurer la stabilité de ces versants, il est nécessaire d'assurer un stockage hors d'eau de ces stériles miniers. Pour se faire, une mise en place des ouvrages en enrochement enterrés se fait au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'installation des versants. Le rôle de ces ouvrages enterrés est de maintenir l'écoulement d'eau à travers le milieu poreux. Le premier objectif de la thèse est donc de mieux comprendre les interactions hydrodynamiques dans les milieux très perméables dans le cas d'écoulements pleinement turbulents. La première partie de ce travail concerne une étude expérimentale menée à l'Institut National Agronomique de Tunisie (INAT) mais aussi à l'Institut de mécanique de fluide de Toulouse (IMFT) dont le but est d'étudier à la fois l'évolution de la ligne d'eau dans les milieux macroporeux et la variation de la perméabilité de ces derniers en fonction du nombre de Reynolds. Des simulations avec des modèles de perte de charge les plus utilisés dans la littérature ont été effectuées, pour tester leur capacité à reproduire la ligne d'eau dans les conditions de nos expériences. Les deux relations de Forchheimer (1901) et d'Ergun (1952) donnent des résultats proches de nos expériences avec des valeurs de coefficients adaptés pour notre cas, alors que la relation de Barree et Conway (2004) ne semble pas reproduire les résultats attendus.

L'eau qui circule dans les ouvrages enterrés est une eau chargée d'où l'intérêt d'étudier le transport sédimentaire dans ces milieux macroporeux. Pour se faire, une étude expérimentale a été réalisée sur le transport et le dépôt des particules dans des milieux synthétiques constitués de particules de diamètre moyen de15 cm.

Mots-clés : milieu macroporeux, écoulement turbulent, transport et dépôt, canal expérimentale, perméamètre, simulation.

Abstract

The 'SLN' Company is one of the largest nickel operators in New Caledonia. The mining waste storage at the operation site is as a slope. To ensure the stability of these slopes, it is necessary to ensure an out of water storage of the waste rock. To do that, an underground rockfill implementation is installed. The purpose of these buried structures is to maintain the flow of water through its pores. The first objective of the thesis is to better understand the hydrodynamic interactions in highly permeable porous media and in case of fully turbulent flows. The first part of this work relates to an experimental study carried out at the National Agronomic Institute of Tunisia (INAT) and the Institute of Fluid Mechanics of Toulouse (IMFT) whose aim is to study the water profile evolution in macro porous media and the permeability variation as a function of the Reynolds number. Simulations with the most widely used pressure drop relationships in the literature were performed to check their ability to reproduce our experimental water profile. The two relations of Forchheimer (1901) and

Ergun (1952) give the most satisfactory results with adapted coefficients values for our case, whereas the Barree and Conway (2004) formula doesn't seems to give expected results.

Given that the circulating water in these buried structures is a charged water, we studied the sedimentary transport in macro porous media. To do this, an experimental study was carried out on the transport and deposition of particles in the studied porous media which mean diameter is d=15 cm.

Key-Words: macro porous media, turbulent flow, transport et deposition, experimental flume, permeameter, simulation.

Sommaire

Résumé 1

Sommaire 3

Liste des figures 8

Liste des tableaux 14

Introduction et position du problème 15

I.PARTIE I..... 19

INTERACTION HYDRODYNAMIQUE DANS LES MILIEUX MACROSCOPIQUES 19

I.1 CHAPITRE 1 20

Synthèse bibliographique..... 20

I.1.1 Introduction..... 21

I.1.2 Définition d'un milieu poreux..... 21

I.1.3 Les écoulements monophasiques dans les milieux poreux et la déviation de la loi de Darcy 22

I.1.3 .1 La loi de Darcy..... 22

I.1.3 .2 Le Nombre de Reynolds et le régime d'écoulement 23

I.1.3. 3 La déviation de la loi de Darcy 26

I.1.3.4 Modèle de Forchheimer (1901)..... 29

I.1.3.5 Modèle d'Ergun (1952)..... 30

I.1.3.6 Modèle de Baree et Conway (2004)..... 31

I.1.3.7 Rappel de nos résultats antérieurs..... 31

I.1.4 Étude de la perméabilité dans les milieux hétérogène de grande porosité..... 36

I.1.5 Exemple d'expériences réalisées dans la littérature 39

I.2 Chapitre 2 41

Installations expérimentales et moyens de mesures 41

I.2.1 Introduction 42

I.2.2 Le grand canal de l'INAT 42

I.2.2.1 Description de l'installation expérimentale 42

I.2.2.2 Les appareils de mesure 45

I.2.3 Le perméamètre de l'INAT 47

I.2.3.1 Le dispositif expérimental 47

I.2.3.2 Appareil de mesure 49

I.2.4 Le perméamètre de l'IMFT 49

I.2.4.1 Le dispositif expérimental 49

I.3.Chapitre 3 51

Expériences réalisées 51

I.3.1 Introduction 52

I.3.2 Expérimentations réalisées sur la partie hydrodynamique 52

I.3.2.1 Protocole des expériences réalisées 52

I.3.2.2 Résultats expérimentaux de la ligne d'eau 52

I.3.3 Expériences complémentaires réalisées dans les perméamètres 57

I.3.3.1 Les expériences réalisées dans le perméamètre de l'INAT 57

I.3.3.2Les expériences réalisées dans les perméamètres de l'IMFT 59

I.4 Chapitre 4 66

Simulation et Modélisation 66

I.4.1 Introduction 67

I.4.2 Calcul de la ligne d'eau 67

I.4.3 Détermination des paramètres des relations de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) par la méthode d'optimisation et comparaison entre ces deux relations 68

I.4.2.1 Optimisation de la relation de Forchheimer (1901) 69

I.4.2.2 Détermination des paramètres de Barree et Conway (2004) 73

1.4.2.3 Optimisation de la relation de Forchheimer (1901) en utilisant la perméabilité de Kozeny Carman (1937) 74

I.4.3 Simulation des expériences dans les perméamètres 79

I.4.3.1 Simulation des expériences dans le perméamètre de l'INAT 79

I.4.3.2 Simulation des expériences dans les perméamètres de l'IMFT 83

I.4.4 Simulation des expériences dans le grand canal de l'INAT 95

I.4.5 Calcul de la section optimale par les différentes relations 98

I.4.5.1 Introduction 98

I.4.5.2 Principe de calcul 98

I.4.6 Conclusion 101

I.4.7 Modélisation des lignes d'eaux expérimentales 101

II.PARTIE 2 124

ETUDE QUALITATIVE DU TRANSPORT SEDIMENTAIRE DANS LES MILIEUX MACROPOREUX 124

II.1 Chapitre 1 125

Synthèse bibliographique 125

II.1.1 Introduction 126

II.1.2 Les équations régissant le phénomène de transport dans les milieux poreux 126

II.1.2.1 La convection 127

II.1.2.2 La dispersion cinématique 127

II.1.2.3 La diffusion moléculaire 127

II.1.2.4 La dispersion hydrodynamique 128

II.1.2.5 L'équation de Convection-dispersion 128

II.1.3 Etudes expérimentales de transport et dépôt dans les milieux poreux 128

II.1.3.1 Etude de colmatage dans les milieux poreux 128

II.1.3.2 Etude de transport des particules dans les milieux macroporeux 129

II.1.3.3 L'étude de Jafar Chapokpour et Ebrahim Amiri Tokaldany (2012) 129

II.1.3.4 L'étude de Mousavi, Ammiri-Tokaldany et Davoudi (2011) 131

II.1.3.5 L'étude de Benyamin Naghavi et Mahmoud Maghrebi (2011) 132

II.1.3.6 L'étude de Nazemi *et al.* (2011) 135

II.1.3.7 L'étude de Mccorquodale et Hannoura (2011) 136

II.1.4 Conclusion 137

II.2 Chapitre2 139

Moyens de mesure mis en œuvre pour l'étude du transport de particules. 139

II.2.1 Introduction 140

II.2.2 Les moyens de mesure pour les expériences du transport solide 140

II.2.3 Conclusion 142

II.3 Chapitre 3 143

Approche expérimentale du transport de particules au sein de milieu représentatif de mèches. 143

II.3.1 Introduction 144

II.3.2 Expériences du transport solide dans le grand canal 144

II.3.2.1 Protocole des expériences 144

II.3.2.2 Protocole de l'expérience de cinétique de dépôt de la matière en suspension et résultats 161

2.3.3 Conclusion 164

Conclusion générale 165

References 167

Annexes 176

Liste des figures

Figure.1 : les sites d'exploitation du nickel de la SLN..... 15

Figure I.1.1 : Table résumant les divers régimes d'écoulement en milieu poreux, selon le nombre de Reynolds de pores. 24

Figure I.1.2 : ESSAIS : I-II-III-IV- Cailloux de diamètre d=0.05m, porosité n=0.485 33

Figure I.1.3 : Valeurs de la constante d'angularité obtenues pour l'ensemble des essais à surface libre en fonction du débit et pour chaque classe de matériau 35

Figure1.1.4 : Courbe logarithmique adaptée à des données de laboratoire ; le nombre de Reynolds en fonction de la perméabilité apparente (Barree et Conway 2004) 39

Figure I.1.5 : Schéma de dispositif expérimental (Dukhan *et al.* 2014)..... 40

Figure I.2.1 : Schéma représentatif du grand canal de l'INAT (vue de dessus) 43

Figure I.2.2 : Schéma du canal. Pour information, le joint en caoutchouc est aussi représenté en entrée du canal (vue de profil) 43

Figure I.2.3 : Schéma des vitres (a) et des couvercles du canal (b)..... 43

Figure I.2.4: Schéma du dispositif expérimental (vue de profil) – Grand canal de l'INAT..... 44

Figure I.2.5 : Détail du collecteur du grand canal de l'INAT 44

Figure I.2.6 : Photo du canal construit au laboratoire 'LSTE' de l'INAT 44

Figure I.2.7 : Grillage utilisé pour fixer les enrochements dans le grand canal de l'INAT..... 45

Figure I.2.8 : Le groupe des électropompes du grand canal de l'INAT 45

Figure I.2.9 : Photo du tableau des piézomètres utilisés pour la mesure de la perte de charge dans le grand canal de l'INAT..... 45

Figure I.2.10 a) Débitmètre électromagnétique Krohne OPTIFLUX 2000, b) système électromagnétique associé..... 47

Figure I.2.11 : Représentation schématique du perméamètre de l'INAT..... 48

Figure I.2.12 : Photos du perméamètre conçu à l'INAT 48

Figure I.2.13 : Photos du grand perméamètre de l'IMFT..... 49

Figure I.2.14 : Perméamètre à petite section de l'IMFT 50

Figure I.2.15 : Enregistreur de la variation de pression..... 50

Figure I.2.16 : Anémomètre a fil chaud utilisé pour la mesure de la vitesse d'écoulement..... 50

Figure I.3.1 : Les deux types de cailloux utilisés 52

Figure I.3.2 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=4l/s 53

FigureI.3.3 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=6l/s 53

Figure I.3.4 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=12l/s 53

Figure I. 3.5 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=14l/s 53

Figure I.3.6 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=16l/s 53

Figure I.3.7 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=18l/s 54

Figure I.3.8 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=22l/s 54

Figure I.3.9 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=4l/s 55

Figure I. 3.10 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=6l/s 55

Figure I.3.11 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=8l/s 55

Figure I.3.12 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=10l/s 55

Figure I.3.13 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=12l/s 56

Figure I.3.14 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=22l/s 56

Figure I.3.15 : Résultats expérimentaux du perméamètre conçu à l'INAT : variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds pour les deux essais (d_1=1cm, d_2=15cm)..... 58

Figure I.3.16 : Ligne d'eau expérimentale pour les deux milieux étudiés (d1=1cm et d2=15cm avec les deux débits 6 et 8 l/s 59

Figure I.3.17 : Résultats expérimentaux de la variation de la perméabilité apparente en fonction du nombre de Reynolds pour le milieu poreux constitué de billes et pour les débits obtenus avec le petit ventilateur dans le grand perméamètre..... 61

Figure I.3.18 : écart type par point de perméabilité en fonction des mesures pour le milieu poreux constitué de billes et pour les débits obtenus avec le petit ventilateur dans le grand perméamètre. 62

Figure I.3.19 : Détermination du débit en fonction du nombre de tour dans le grand perméamètre de l'IMFT avec le grand ventilateur..... 63

Figure I.3.20 : variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds pour le milieu poreux constitué des billes dans les perméamètres de l'IMFT..... 63

Figure I.3.21 : Résultats des différentes expériences réalisées dans les perméamètres de l'INAT et de l'IMFT 65

Figure I.4.1 : Résultats des simulations des lignes d'eau pour chaque couple de paramètre k_d et F pour les deux débits a) 20 l/s et b) 30 l/s pour l'expérience avec les cailloux de diamètre moyen d=7cm .. 71

Figure I.4.2 : Surface de l'erreur en fonction du couple k_d et F du modèle de Forchheimer (1901) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=7cm 71

Figure I.4.3 : surface de l'erreur en fonction du couple k_d et F du modèle de Forchheimer(1901) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=5cm. 72

Figure I.4.4 : surface de l'erreur en fonction du couple de k_{mr} et T du modèle de Barree et Conway (2004) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=7cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s 73

Figure I.4.5 : surface de l'erreur en fonction du couple de k_{mr} et T du modèle de Barree et Conway (2004) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=5cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s 74

Figure I.4.6 : Surface de l'erreur en fonction du couple de kmr et T du modèle de Barree et Conway (2004) en utilisant la perméabilté de Kozeny Carman (1937) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=5cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s 75

Figure I.4.7 : Surface de l'erreur en fonction du couple de kmr et T du modèle de Barree et Conway (2004) en utilisant la perméabilté de Kozeny Carman (1937) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=7cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s. 76

Figure I.4.8 : Simulation des lignes d'eau avec les deux relations de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) pour le milieu constitué des cailloux de diamètre moyen d=7 cm 78

Figure I.4.9 : Simulation des lignes d'eau avec les deux relations de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) pour le milieu constitué des cailloux de diamètre moyen d=5 cm 78

Figure I.4.10 : Simulations de la variation de la perméabilité apparente en fonction du nombre de Reynolds pour les expériences du perméamètre de l'INAT 80

Figure I.4.11 : Simulation de la variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds dans les pores pour les expériences du perméamètre de l'INAT en utilisant une perméabilité de Darcy calculée par la relation de Kozeny Carman (1937). 81

Figure I.4.12 : Régime d'écoulement des expériences réalisées dans le perméamètre de l'INAT : variation de $\Delta P/L$ en fonction de la vitesse d'écoulement 83

Figure I.4.13 : comparaison des résultats des expériences de Dukhan (2014) et de l'IMFT avec les différents modèles 84

Figure I.4.14 : Comparaison entre différents modèles étudiés pour les expériences de l'IMFT 86

Figure I.4.15 : Perte de pression réduite par rapport à la vitesse moyenne: régime inertiel et régime turbulent 87

Figure I.4.16 : simulation des expériences en cas d'écoulement laminaire non linéaire 88

Figure I.4.17 : simulation des expériences en cas d'écoulement inertiel 90

Figure I.4.18 : simulation des expériences en cas d'écoulement turbulent 91

Figure I.4.19 : simulation des expériences avec les cailloux d= 1cm dans le grand perméamètre 93

Figure I.4.20 : simulation des expériences avec les cailloux d= 1cm dans le petit perméamètre 94

Figure I.4.21 : simulation de la ligne d'eau par la relation de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) pour une mèche de cailloux de diamètre moyen d=1cm et pour les différents débits traités 95

Figure I.4.22 : simulation des lignes d'eau pour les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=15 cm pour débits de 6l/s à 18l/s 96

Figure I.4.23 : simulation des lignes d'eau pour les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=15 cm pour débits de 20 l/s à 44 l/s 97

Figure I.4.24 : Application de la formule de Bernoulli entre deux sections de la mèche..... 99

Figure 1.4.25 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 6 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm..... 103

Figure I.4.26 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 8 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm..... 104

Figure 1.4.27 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 10 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm..... 105

Figure 1.4.28 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 12 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm..... 106

Figure 1.4.29 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 14 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm..... 107

Figure 1.4.30 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 18 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm..... 108

Figure I.4.31 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 6 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm..... 110

Figure I.4.32 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 10 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm..... 111

Figure I.4.33 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 12 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm..... 112

Figure I.4.34 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 14 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm..... 113

Figure I.4.35 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 16 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm..... 114

Figure I.4.36 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 18 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm..... 115

Figure I.4.37 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 20 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm..... 116

Figure I.4.38 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 22 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm 117

Figure I.4.39 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 24 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm 118

Figure I.4.40 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 28 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm 119

Figure I.4.41 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 32 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm 120

Figure I.4.42 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 36 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm 121

Figure I.4.43 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 40 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm 122

Figure I.4.44 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 44 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm 123

Figure II.1.1 : graphique comparant les résultats expérimentaux et numériques de gradient hydraulique critique (Jafar Chapokpour et Ebrahim Amiri Tokaldany (2012)) 130

Figure II.1.2 : schéma du canal expérimental utilisé pour les expériences de Mousavi et *al.* (2011) . 131

Figure II.1.3 : a, une section longitudinale du dispositif expérimental, b est la section transversale du canal a l'amont du milieu poreux et c en aval des milieux poreux 133

Figure II.1.4 : Le barrage en enrochement du laboratoire et l'alimentation en sédiments durant l'essai 135

Figure II.1.5 : comparaison des différentes lois de calcul du gradient hydraulique critique ic 136

Figure II.2.1 : photo du géotextile de 150g/m² utilisé 140

Figure II.2.2 : photo d'un turbidimètre 141

Figure II.2.3 : photo des filtres en verre utilisés 142

Figure II.2.4 : séchage des filtres avant utilisation 142

Figure II.3.1: Le sable utilisé dans les expériences du transport solide 144

Figure II.3.2 : Dispositif de l'expérience de granulométrie pour le sable utilisé ; (a) : les tamis utilisés, (b) : photo de l'agitateur électrique 145

Figure II.3.3 : Courbe granulométrique du sable utilisé dans les expériences à l'INAT 145

Figure II.3.4 : Variation du poids du sable piégé et sable injecté en fonction du débit 146

Figure II.3.5 : Evolution de la turbidité en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale du sable injecté de 4 kg 148

Figure II.3.6 : Evolution de la turbidité en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de 6 kg 149

Figure II.3.7: Comparaison entre l'évolution de la turbidité en fonction du temps à l'amont pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 6 kg et 4 kg 150

Figure II.3.8 : comparaison entre l'évolution de la turbidité en fonction du temps à l'aval pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 6 kg et 4 kg 151

Figure II.3.9 : Evolution de la turbidité en du milieu poreux fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 2 kg 152

Figure II.3.10 : Evolution de la turbidité du milieu poreux en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 8 kg 153

Figure II.3.11 : Comparaison entre les variations de la turbidité en fonction du temps à l'amont du milieu poreux pour un débit de 10 l/s et une quantité de sable injecté variable 154

Figure II.3.12 : Comparaison entre les variations de la turbidité en fonction du temps à l'aval du milieu poreux pour un débit de 10 l/s et une quantité de sable injecté variable 155

Figure II.3.13 : Courbe log-log de la variation de la turbidité en fonction du temps à l'amont du milieu poreux pour un débit de 10 l/s 156

Figure II.3.14 : Courbe log-log de la variation de la turbidité en fonction du temps à l'amont du milieu poreux pour un débit de 10 l/s 157

Figure II.3.15: La ligne d'eau obtenue avec le débit Q= 10 l/s 158

Figure II.3.16 : Comportement de la turbidité lors d'une expérience de nettoyage (passage brusque de 10 à 30l/s) 159

Figure II.3 17 : Photo de colmatage de l'entrée de milieu poreux (50cm) avec du sable blanc 160

Figure II.3.18 : Variation de la turbidité en fonction du temps à l'aval du milieu poreux pour l'expérience de décolmatage avec un débit Q=35 l/s 160

Figure II.3.19 : Séchage des filtres avant utilisation 161

Figure II.3.20 : Photo du dispositif du filtrage 161

Figure II.3.21 : Mesure du poids des filtres après filtrage et séchage 162

Figure II.3.22 : Variation de la matière en suspension en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité de sable injecté de 6 kg 163

Liste des tableaux

Tableau I.1.1 : Quelques expressions du nombre de Reynolds 23

Tableau I.1.2 : Nombre de Reynolds correspondant au début des fluctuations dans les milieux poreux 26

Tableau I.1.3 : quelques relations de calcul de perte de charge dans la littérature 28

Tableau I.1.4: Modèle de l'écoulement dans des mèches en enrochements 32

Tableau I.4.1: Perméabilité de Darcy, perméabilité de Forchheimer (1901) et coefficient de Dukhan A Dukhan et *al.* (2014) 77

Tableau I.4.2 : Paramètres de simulation obtenus en utilisant la perméabilté déterminée par la méthode d'optimisation 77

Tableau I.4.3 : Paramètres de simulation obtenus en utilisant la perméabilté de Kozeny Carman (1937) 77

Tableau I.4.4 : Les paramètres de simulation des expériences avec les deux types des cailloux 81

Tableau I.4.5 : Paramètres de simulation des expériences dans le perméamètre de l'INAT, avec les deux types des cailloux, d=1cm et d=15 cm, où la perméabilité de Darcy est déterminée par la relation de Kozeny Carman (1937) 82

Tableau I.4.6 : Paramètres de simulation des expériences de Dukhan (2014) et de nos expériences avec les billes 85

Tableau I.4.7 : Valeurs des coefficients utilisés en fonction de la gamme de Rep pour des expériences avec les billes dans les perméamètres de l'IMFT 92

Tableau I.4.8 : Valeurs des coefficients utilisés en fonction de la gamme de Re_p pour les expériences avec les cailloux dans les perméamètres de l'IMFT 94

Tableau I.4.9 : Section minimale calculée par chaque relation 100

Tableau II.1.1 : caractéristiques expérimentales des données utilisées 130

Tableau II.1.2 : caractéristique des milieux utilisés 134

Tableau II.3.1 **:** Résultats expérimentaux de la mesure de la matière en suspension 163

Introduction et position du problème

Les écoulements dans les milieux poreux ont été l'objectif de nombreuses études dans différents domaines tels que l'hydrogéologie dans le cas de l'étude des écoulements souterrains, le domaine de l'exploitation pétrolière en étudiant par exemple le phénomène de migration du fluide dans les roches réservoirs, dans le domaine biologique en considérant la peau comme milieu poreux et aussi dans le domaine de l'exploitation minière ce qui est le cadre de ce sujet de thèse. Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre l'Institut National Agronomique de Tunisie 'INAT', le bureau d'ingénierie international MECATER et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse 'IMFT'. Il porte sur le problème des écoulements dans les milieux poreux très perméables. En effet, suite à une première étude de ce problème dans le cadre d'un Mastère de recherche, dont l'objectif était de vérifier la capacité de la relation de Stephenson (1979) à reproduire la ligne d'eau dans ce type d'écoulement, il s'est avéré nécessaire de mieux comprendre et prévoir les paramètres hydrodynamiques effectifs de ces milieux. Cette étude est réalisée en partenariat avec la société le Nickel 'SLN' du groupe ERAMET, situé en Nouvelle-Calédonie, pour étudier les écoulements dans des ouvrages constitués d'enrochements hétérogènes au-dessus desquels se fait le stockage hors d'eau des stériles miniers.



Figure.1 : les sites d'exploitation du nickel de la SLN

La société Le Nickel (SLN) est fondée le 18 mai 1880 pour l'exploitation de mines de nickel en Nouvelle-Calédonie1. Elle naît par le regroupement de deux sociétés d'exploitation et de transformation du nickel nées en 1877. La SLN exploite les quatre grands sites présentés dans la figure1.

Dans les hautes montagnes de la nouvelle Calédonie, le stockage hors d'eau des stériles miniers se fait au niveau des versants de talweg[1] par la mise en place d'un ouvrage en enrochement enterré à travers lequel passe l'écoulement. Dans la majorité des cas, ces écoulements sont turbulents, d'où l'intérêt de mieux comprendre les écoulements turbulents dans les milieux très perméables mais aussi de déterminer des relations constitutives reliant les propriétés telles que la perméabilité, à la géométrie et aux conditions limites par exemple.

Une première étude dans le cadre de mon mastère a montré que l'évolution de la perte de charge en fonction de la perméabilité n'est plus linéaire lorsque le nombre de Reynolds augmente. La perte de charge ne s'exprime plus par la relation de Darcy, ceci étant bien évidement dû à la manifestation des forces inertielles qui ne sont plus négligeables. Cette première étude dont l'objectif était d'étudier la capacité de la relation de Stephenson qui permet de déterminer la perte de charge par une relation en V^2 et sans tenir compte d'un terme linéaire a montré aussi la nécessité d'étudier l'influence de la variation de la perméabilité du milieu sur l'évolution de la ligne d'eau. La relation de Stephenson exprime la perte de charge en fonction d'un paramètre d'ajustement qui est le coefficient d'angularité. Pour cela, on a testé différents modèles qui se basent sur d'autres jeux de paramètres.

Dans une première partie, on s'intéresse à un problème particulier de détermination de la perméabilité en milieux poreux très perméable (étude théorique, expérimentale et numérique). La perméabilité est un paramètre qui influence considérablement les écoulements. L'estimation de ce paramètre est primordiale pour une étude hydraulique consistante.

En plus de la production des stériles miniers, l'exploitation minière du nickel engendre la production d'une grande quantité de déchets qui s'infiltre dans l'écoulement. Cela génère des risques de colmatage des pores de l'ouvrage enterré, ce qui nous amènera donc à l'investiguer plus avant.

[1] Un talweg est une dépression présente dans la topologie du terrain.

La seconde partie de la thèse traitera alors le problème de colmatage dans ces milieux par mesure de la turbidité à l'amont et à l'aval de ces ouvrages. Nous utiliserons aussi l'évolution de la ligne d'eau qui devrait varier en fonction du dépôt et de la remise en suspension des sédiments. Pour cela, nous mesurerons la charge sédimentaire à l'amont et à l'aval du milieu étudié.

La thèse est divisée en deux parties ; une première concerne l'étude hydrodynamique et une deuxième partie concernant le transport et dépôt des particules dans les milieux macroporeux.

Les deux parties renferment une étude bibliographique et une étude expérimentale.

La partie hydrodynamique, renferme aussi un chapitre de simulation et modélisation des expériences réalisées.

I.PARTIE I

INTERACTION HYDRODYNAMIQUE DANS LES MILIEUX MACROSCOPIQUES

I.1 CHAPITRE 1

Synthèse bibliographique

I.1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, on présentera les travaux existants dans la littérature, relatifs à la loi de Darcy et son extension pour des écoulements turbulents dans les milieux poreux où les forces inertielles ne sont plus négligeables. On se focalisera sur la variation de la perméabilité avec le régime d'écoulement. On montrera qu'une correction à la loi de Darcy est nécessaire et que l'écoulement influe sur la perméabilité. Pour ce faire, on présentera une revue bibliographique sur les différentes lois de perte de charge existantes. A la fin du chapitre, on rappellera les principaux résultats du mastère de M.Jouini (2012) sur ce sujet.

I.1.2 Définition d'un milieu poreux

En général, un milieu poreux est défini comme une matrice solide, à travers laquelle le liquide ou le gaz s'écoule. Mais en hydrogéologie, on identifie deux types différents de réservoir :

- le réservoir composé d'un milieu poreux ou aquifère à porosité d'interstices qui est un milieu perméable comportant des pores interconnectés et dans ce cas, on parle de milieu continu, comme les sables ou les grès peu cimentés. Le milieu est alors caractérisé par des propriétés macroscopiques, souvent déterminées par des corrélations empiriques. Ce type d'approche est particulièrement adapté pour simuler le comportement d'un système de grandes dimensions, comme un lit de débris, mais n'a de sens que dans le domaine de validité des corrélations utilisées (Lominé 2007).
- Le réservoir fissuré qui est un milieu généralement peu perméable dans lequel l'eau s'écoule à travers un réseau de fissures ou de fractures ouvertes, diversement interconnectées (roches cristallines, grès cimenté, calcaire fissuré ou karstifié).

Dans notre étude, on s'intéresse aux milieux poreux à porosité d'interstices n exprimée par le rapport du volume des vides par le volume total de l'échantillon.

$$n = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total de l'échantillon}} \quad (1)$$

Ce paramètre exprime la quantité de vide dans un milieu poreux et il dépend de

- la forme des grains
- la surface spécifique des grains (augmentation avec la diminution relative du diamètre des grains)
- l'assemblage des grains
- la compaction de l'assemblage

- la rugosité des grains

Pour simplifier le problème, on a souvent recours à l'utilisation de particules sphériques homogènes pour construire un milieu poreux modèle.

I.1.3 Les écoulements monophasiques dans les milieux poreux et la déviation de la loi de Darcy

I.1.3 .1 La loi de Darcy

La loi de Darcy a été exprimée par Henry Philibert Gaspard Darcy (Darcy, 1856) qui a proposé une relation empirique exprimant la perte de charge en fonction de la vitesse en se basant sur des expériences. Il a étudié des écoulements monophasiques, à travers des milieux sableux, dans une colonne. Ses observations ont montré, qu'à faible nombre de Reynolds (défini dans La prochaine section), la perte de charge varie linéairement avec la variation de la vitesse de l'écoulement (Darcy 1956, Paux 2011 et Clavier 2015). Cette loi est utilisée jusqu'à nos jours comme un modèle pour les écoulements en milieux poreux (Jaquet 2013). Elle est aussi valide dans le cas des milieux poreux anisotropes pour des écoulements tridimensionnels (Huyakorn et *al.* 1987 ; Younes 2003 ; Paux 2011):

$$\vec{\mathbf{V}} = -\frac{K_d}{\mu}\nabla P \tag{2}$$

Où K_d est un tenseur d'ordre 2, représentant la perméabilité (m^2), $\vec{\mathbf{V}}$ est la vitesse d'écoulement ou la vitesse de Darcy, c'est-à-dire la vitesse moyenne sur la section traversée (m/s), P est la pression (Pa) et μ est la viscosité dynamique du fluide (Pa.s).

Dans notre cas d'étude, on considère que notre milieu est homogène et isotrope et dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, on peut exprimer la loi de Darcy comme suit :

$$V = \frac{K_d}{\mu}\frac{\Delta P}{\Delta x} \tag{3}$$

Darcy (1856) a obtenu cette relation pour des écoulements à faibles vitesses. Il n'a pas pu atteindre des vitesses plus importantes pour des raisons de stabilité de l'écoulement de la source. Cette relation n'est applicable que pour des écoulements à faible nombre de Reynolds de pores, pour lesquels les forces inertielles sont négligeables. Ceci a été démontré par nombreuses études réalisées dans l'objectif de déterminer la limite de validité de la loi de Darcy (Schneebeli 1955 ; Chauveteau et Thirriot 1967). Cette limite est donc exprimée grâce au nombre de Reynolds.

I.1.3 .2 Le Nombre de Reynolds et le régime d'écoulement

a- Définition du nombre de Reynolds

C'est un nombre adimensionnel qui permet de déterminer le régime d'un écoulement dans un milieu poreux. En faisant l'analogie entre un écoulement dans les pores d'un milieu poreux et l'écoulement dans un tube, il est possible de donner une limite en nombre de Reynolds (Paux 2011). Il est défini en fonction d'une longueur et d'une vitesse caractéristiques comme suit :

$$R_e = \frac{V\,d}{\nu} \tag{4}$$

Avec V est la vitesse de l'écoulement (m/s), υ est la viscosité cinématique (m^2/s) et d, une dimension caractéristique (m). Le choix de l'expression du paramètre d présente une grande diversité dans la littérature. Certains chercheurs le considèrent comme une dimension caractéristique de l'hydrodynamique (d en sqrt(k) : Dukhan (2014)), d'autres le comparent à une caractéristique géométrique du milieu poreux (diamètre des particules, diamètre de pores : Kozeny Carman (1937) ; Ergun (1952) ; Scheidegger (1960)). Le tableau suivant regroupe quelques expressions proposées pour le nombre de Reynolds dans la littérature.

Tableau I.1.1 : Quelques expressions du nombre de Reynolds

Auteur	Re
Kozeny Carman (1937)	$\frac{d\,V}{\nu(1-n)}$, où d est le diamètre moyen des particules, n est la porosité du milieu.
Ergun (1952)	$\frac{2r_e V}{\nu}$, où $r_e = \frac{3}{S_v}$ est le rayon efficace des particules et S_v est la surface de solide par unité de volume de solide.
Scheidegger (1960)	$\frac{2r_h V}{\nu}$, où r_h est le rayon hydraulique.
Dullien (1979)	$\frac{V\,d}{\nu}$, où d est le diamètre moyen des particules.
Forchheimer (1901)	$\frac{V\beta K}{\nu}$, où est la constante de Forchheimer
Stephenson (1979)	$Re_p = \frac{V\,d}{\nu\,n}$, où n est la porosité du milieu poreux
Barree et Conway (2004)	$\frac{V}{\nu\,T}$, où T est une constante de transition de Barree et Conway.

Dans notre étude, on a utilisé le nombre de Reynolds dans les pores Re_p basé sur le diamètre des particules et de la porosité du milieu étudié.

b- Régime d'écoulement

Schneebeli (1956) a réalisé des expériences avec des billes de verre de diamètre moyen d=27mm, où le nombre de Reynolds variait entre 0.3 et 800. Il a remarqué que l'on peut distinguer trois régimes d'écoulement dans les milieux poreux en fonction du nombre de Reynolds de la manière suivante (Schneebeli 1956):

1- Pour des nombres de Reynolds très petits : l'écoulement est laminaire et la vitesse est liée linéairement à la perte de charge : c'est la loi de Darcy
2- Pour des nombres de Reynolds intermédiaires ; l'écoulement est inertiel (laminaire non linéaire) et suit une loi linéaire comportant un terme correctif additionnel du second degré en V^2
3- Pour un nombre de Reynolds très élevé : l'écoulement est turbulent et le terme en V^2 domine.

Ceci confirme que la loi linéaire de Darcy n'est pas applicable pour tous les régimes d'écoulement. Certains auteurs définissent un nombre de Reynolds critique R_{ec} (Sheidegger 1960) à partir duquel la relation de Darcy n'est plus valide. Il a été démontré que cette valeur correspond au début de la prédominance des forces inertielles par rapport aux forces de viscosité.

La détermination des deux limites entre les trois régimes a été l'objet de plusieurs études.

Dans son étude, Comiti *et al.* (2000) a proposé une échelle de changement de régime en se basant sur le nombre de Reynolds dans les pores Re_p.

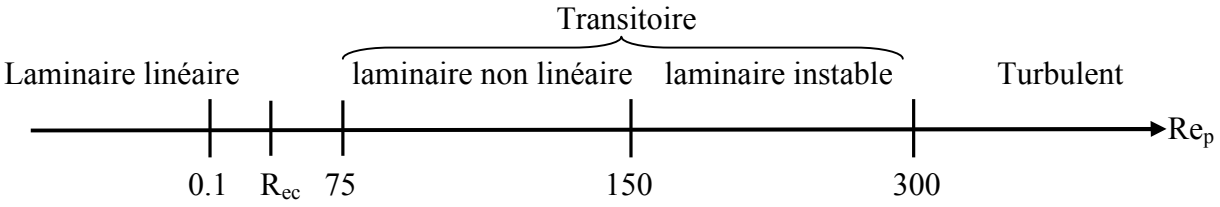


Figure I.1.1 : Table résumant les divers régimes d'écoulement en milieu poreux, selon le nombre de Reynolds de pores.

Ces limites ne sont pas fixes et varient selon les types de milieu poreux. Selon Jin (2015) l'apparition de la turbulence s'observe à des valeurs variables du Reynolds. En effet ces

valeurs dépendent de l'expression utilisée pour le calcul du nombre de Reynolds, du diamètre moyen et de l'arrangement des particules formant le milieu poreux, ce qui fait que même pour le même milieu poreux, ces valeurs peuvent varier.

Dans la littérature, on décrit aussi un quatrième régime de transition entre le régime non linéaire et le régime turbulent appelé « laminaire instable » (Dybbs et Edwards 1984 ; Comiti *et al.* 2000). La limite supérieure de ce régime en nombre de Reynolds à partir duquel l'écoulement est pleinement turbulent s'observe entre Re=500 (Dybbs 1984, Latifi 1989) jusqu'à environ 20000 selon (Kuwahara 1998).

Seguin *et al.* (1998) ont étudié la transition de l'écoulement du régime laminaire au régime turbulent dans les milieux poreux, et ils ont donné des explications physiques de la nature de la turbulence en se basant sur des mesures locales complexes. L'objectif de leur étude était de déterminer la limite du régime laminaire stable dans des milieux poreux variant en forme et taille. L'analyse spectrale des fluctuations du signal permet une détermination précise de la fin du régime laminaire stable dans les milieux étudiés. Les résultats sont exprimés grâce à un nombre de Reynolds dans les pores Re_p, basé sur une représentation capillaire du milieu poreux. Un nombre de Reynolds, $Re_p = 180$, caractérise la fin du régime laminaire stable dans des lits de particules présentant une isotropie dans le plan perpendiculaire à la direction principale de l'écoulement du fluide.

De nombreux auteurs (Stephenson 1979 ; Barree et Conway 2004) ont observé que, dans divers milieux poreux, la perte de charge mais aussi le coefficient de transfert de masse dépendent du nombre de Reynolds. En effet, l'évolution de la perte de pression par rapport à la vitesse du fluide est linéaire pour des nombres de Reynolds bas, correspondant au écoulement laminaire (dit de Darcy) ; alors qu'un terme quadratique, correspondant notamment au développement de la dégradation de l'énergie cinétique dans les constrictions des pores et des changements de direction de l'écoulement, apparaît pour les nombres Reynolds supérieurs et prédomine progressivement (Scheidegger, 1960, Venkataraman et Rama Mohan Rao (1998)). Comme le suggèrent Colquhoun-Lee et Stepaneck (1974) dans le cas des régimes de transfert de masse, les écoulements à la fois laminaires et turbulents doivent exister dans le milieu pour les nombres de Reynolds supérieurs à une valeur critique.

Le tableau I.1.2 récapitule les nombres de Reynolds correspondant au début des fluctuations de vitesse dans les milieux poreux constitués des particules sphériques selon(Mickley et al

(1965) ; Jolls et Hanratty (1966) ; Vander Mrwe (1971) ; Wegner et al. (1971) Dybbs et Edward (1983) ; Latifi et al. (1989) et Rode et al. (1994)). Comme les techniques utilisées étaient diverses, ainsi que le diamètre des particules et la porosité du milieu, on remarque un écart entre les résultats, ce qui démontre que la structure du milieu a une forte influence sur l'hydrodynamique.

Tableau I.1.2 : Nombre de Reynolds correspondant au début des fluctuations dans les milieux poreux

Auteur	Diamètre et nature du milieu poreux (cm)	R_{ep} du Début des fluctuations
Mickley et *al.* 1965	Sphères 3.81	4000-7000
Jolls et Hanratty 1966	Sphères 2.54	300
Vander Mrwe 1971	Sphères 7	2500, 5000, 10000, 27000
Wegner et *al.* 1971	Sphères 7.5	90-120
Dybbs et Edward 1983	Arrangement des cylindres	300
Latifi et *al.* 1989	Sphères 0.5	400
Rode et *al.* 1994	Sphères 0.5	300

I.1.3. 3 La déviation de la loi de Darcy

La déviation de la loi de Darcy a été observée lorsqu'il y a augmentation du nombre de Reynolds. Elle est attribuée à la prédominance des forces inertielles par rapport aux forces de frottement. On ajoute un deuxième terme, non linéaire, dépendant quadratiquement de la vitesse, à la relation de Darcy. Dans ce qui suit, on présente quelques modèles de la littérature pour le calcul de la perte de charge dans les milieux poreux dans le cas des écoulements turbulents.

Pour décrire les écoulements en milieu poreux n'obéissant pas à la loi de Darcy, deux types de lois de perte de charge ont été proposées, la première est de type quadratique et dite de Forchheimer (1901) et l'autre de type loi de puissance est connue sous le nom de l'équation d'Izbash (1931) (Hansen (2004) ; Soualmia *et al.* 2017).

$$j = A_1 V + A_2 V^2 \qquad (5)$$

$$j = A_3 V^w \quad (6)$$

Avec ; j : le gradient hydraulique, w, A1 A2 A3 : des constantes dépendantes des propriétés du milieu rocheux et de l'écoulement.

Dans les milieux consolidés, la perte de charge en cas d'écoulement turbulent peut être décrite par un polynôme d'ordre 3 (Lage *et al.* 1997), voire même par des expressions non-polynômiales (Soulaine 2014).

Le tableau ci-après regroupe quelques lois de perte de charge pour un écoulement monophasique présentées dans la littérature.

Tableau I.1.3 : Quelques relations de calcul de perte de charge dans la littérature

Auteur	Coefficient de frottement	Remarques
MacDonald (1979)	$\frac{1-n}{n^3}\left(\frac{180}{R_e}+b\right)$	b = 1, 8 (particules lisses) b = 4 (particules rugueuses)
Hicks (1970)	$6.8\frac{(1-n)}{n^3}R_e^{-0.2}$	500 < Re < 60000
Rose et Rizk (1970)	$1000R_e^{-1}+125R_e^{-0.5}+14$	1000 < Re < 6000
Tallmadge (1970)	$\frac{(1-n)}{n^3}\left(\frac{150}{R_e}+\frac{4.2}{R_e^{1/6}}\right)$	0, 35 < n < 0, 88 0, 1 < Re < 105
Lee et Ogawa (1974)	$6.25\frac{(1-n)^2}{n^3}\left(\frac{29.32}{R_e}+\frac{156}{R_e^a}+0.1\right)$	a = 0, 352 + 0, 1n + 0, 275n^2 1 < Re < 10^5
Ozahi et al (2008)	$\frac{1-n}{n^3}\left(\frac{160}{R_e\psi^2}+\frac{1.61}{\psi}\right)$	Particules non sphériques de sphéricité 0, 55 < < 1 0, 36 <n < 0, 56 800 < Re < 8000
Montillet et al (2007)	$a\frac{1-n}{n^3}\left(\frac{d}{D}\right)^{0.2}\left(\frac{1000}{R_e}+\frac{60}{R_e^{0.5}}+12\right)$	Lit tassé : a = 0, 061 Lit non tassé : a = 0, 050 4, 8 < $\frac{d}{D}$ < 50 (D : diamètre du lit ; d : diamètre des billes) 10 < Re < 2500

Dans notre étude, on s'est intéressé à vérifier la capacité de trois relations de perte de charge à reproduire la ligne d'eau dans le cas d'un écoulement turbulent dans les milieux macroporeux.

Ces relations sont celles de Forchheimer (1901), Ergun (1952), et Barréé et Conway (2004), et de faire une comparaison entre celles-ci.

I.1.3.4 Modèle de Forchheimer (1901)

Forchheimer (1901) a défini une relation quadratique entre le gradient de pression et la vitesse dans un milieu isotrope de la forme suivant :

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K}\left|\vec{V}\right| + \rho\,\beta|V|\left|\vec{V}\right| \qquad (7)$$

Avec β est un coefficient qui dépend du nombre de Reynolds, dp : la perte de pression (Pa), μ : la viscosité cinématique du fluide (m^2/s), K : la perméabilité du milieu poreux (m^2), V : la vitesse moyenne de l'écoulement (m/s).

Barree et Conway (2004) ont confirmé que la relation de Forchheimer (1901) présente des limites d'application dans le cas des écoulements à très grandes vitesses. Barree et Conway (2004), Dukhan *et al.* (2014) ont trouvé que pour adapter la relation de Forchheimer à ce type d'écoulement il faut abandonner l'idée que le coefficient β doit être constant. Il est en fait variable et dépendant du régime de l'écoulement. De ce fait, plusieurs corrélations ont été proposées pour estimer ce coefficient dans des milieux poreux isotropes. Cependant, dans la nature et pour la majorité des cas étudiés les milieux poreux sont anisotropes. X Wang *et al.* (1989) ont proposé une forme tensorielle de la relation de Forchheimer (1901) pour ces milieux anisotropes :

$$-\left(\nabla\vec{p}\right)_j = \left(\mu\,\overline{\overline{k_{dij}^{-1}}} + \rho\,\overline{\overline{C_{ij}}}\left\|\vec{V}\right\|_j\right)V_i \qquad (8)$$

Où $C = (k\,\beta)$ est le produit des tenseurs.

Pour tester cette relation, Wang *et al.* (1989) ont calculé la perte de charge dans différentes conditions d'écoulement. Tandis que pour calculer les tenseurs k et β, ils ont fait varier certains paramètres morphologiques à l'échelle du pore et ont déterminé leurs effets sur les différentes propriétés macroscopiques de l'écoulement.

I.1.3.5 Modèle d'Ergun (1952)

Dans l'objectif de relier la perte de charge aux caractéristiques structurales du milieu poreux et en se basant sur 640 expériences réalisées avec des milieux poreux constitués de particules sphériques de différent diamètres dont le nombre de Reynolds varie entre 0.4 et 1000, Ergun a proposé la relation suivante (Ergun. S 1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = A\frac{(1-n)^2\mu}{n^3 d^2}V + B\frac{(1-n)\rho}{n^3 d}V^2 \qquad (9)$$

Pour des particules sphériques, il a proposé les deux valeurs de A et B successivement 150 et 1,75. Ces deux valeurs ont été proposées comme universelles alors que le contraire a été montré (Dukhan *et al*. 2014).

Fand *et al.* (1987) ont testé différent milieux poreux constitués de sphères ayant différents diamètres. Ils ont montré que les valeurs de A et B variaient en fonction de diamètre des particules.

Mac Donald *et al* (1979) ont réalisé des expériences aves des milieux poreux de différentes rugosités (des sphères, graviers, cylindres….) et ils ont proposé de calculer le diamètre équivalent des particules pour des milieux rugueux par la relation suivante :

$$d_p = \frac{6}{a_{vs}} \qquad (10)$$

Avec a_{vs} est la surface spécifique des particules.

Ils ont trouvé que A=180 alors que B est une fonction de la rugosité des particules et comprise entre 1.8 pour les matériaux lisses et 4 pour les matériaux rugueux.

Comiti *et al.* (1989) ont étudié deux types de milieux constitués de particules sphériques de diamètre moyen d_1=1.12 mm et d_2=4.99 mm. Ils ont obtenu une valeur moyenne de A=141 et B= 1.63 pour les milieux poreux qu'ils ont testés. Notons qu'ils ont obtenu une valeur de A= 140 et B= 1.68 pour le premier milieu, et A=142 et B=1.59 pour le deuxième milieu.

La perméabilité d'Ergun peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$k = \frac{d^2 n^3}{150(1-n)^2} \qquad (11)$$

I.1.3.6 Modèle de Baree et Conway (2004)

Baree et Conway (2004) ont proposé une nouvelle équation plus générale. La loi de Darcy est toujours applicable mais au lieu de la perméabilité absolue ils ont utilisé une perméabilité apparente, selon la formule suivante :

$$\frac{-\partial p}{\partial L} = \frac{\mu V}{K_{app}} = \frac{\mu V}{k_d\left(k_{mr} + \frac{1-k_{mr}}{1+\rho V / \mu T}\right)} \tag{12}$$

Si on veut écrire le modèle de Barree et Conway (2004) sous forme de $AV+BV^2$ on obtient la relation suivante :

$$J = \frac{\mu V}{k_{min}\frac{\rho V}{\mu T} + K_d} + \frac{\rho V^2}{k_{min}\frac{\rho V}{\mu} + T k_d} \tag{13}$$

Avec μ est la viscosité cinématique du milieu (m^2/s), V est la vitesse moyenne (m/s), K_{app} est la perméabilité apparente (m^2), k_{min} est le minimum de perméabilité relative à la perméabilité de Darcy (m^2), T est une longueur caractéristique (m^{-1}). Dans ce qui suit, une étude bibliographique concernant la détermination de la perméabilité des milieux poreux dans le cas d'un écoulement turbulent est considérée.

I.1.3.7 Rappel de nos résultats antérieurs

Dans le cadre de mon mastère (Jouini 2012), un canal de grandes dimensions a été construit à l'INAT, L'objectif était de vérifier la capacité de la relation de Stephenson (1979) décrite ci-dessous, à reproduire le profil d'eau dans ce type de milieu. Le dispositif expérimental sera détaillé dans le chapitre suivant.

I.1.3.7.1 La relation de Stephenson (1979)

L'équation de Stephenson (1979) est parmi les plus couramment utilisées et nous l'avons mise en œuvre dans la simulation de nos expériences. Il s'agit d'une relation quadratique permettant d'expliquer la perte de charge en fonction du carré de la vitesse de l'écoulement :

Le modèle de Stephenson est défini par :

$$J = (800Re_p^{-1} + K_t)\frac{V_p^2}{gd} \qquad Re_p = \frac{V_p d}{\nu} \tag{14}$$

Où d représente le diamètre moyen des particules (m). Le paramètre k_t, varie suivant la forme des enrochements et il est couramment désigné comme la constante d'angularité. Plusieurs auteurs (Bari et Hansen 2004) indiquent des valeurs proches de 1 pour des cailloux lisses et de 4 pour des cailloux présentant d'importantes rugosités.

Durant le mastère, on a testé ce modèle dans le cas d'un écoulement à surface libre et en charge. Dans le tableau ci-après on présente l'équation de la ligne d'eau dans les deux cas.

Tableau I.1.4: Modèle de l'écoulement dans des mèches en enrochements

ÉCOULEMENT À SURFACE LIBRE	**ÉCOULEMENT EN CHARGE**
$V_p = \frac{Q}{nhB}$ **(15)**	$V_p = \frac{Q}{nh_M B} = constante$ **(16)**
$\frac{dh}{dx} = \frac{I-J}{1-Fr_p^2}$ $avec$ $Fr_p^2 = \frac{V_p^2}{gh}$ **(17)**	$\frac{dh}{dx} = \frac{1}{\rho g}\frac{dp}{dx} = I - J$ **(18)**

Les équations précédentes sont résolues en imposant la pression exprimée en hauteur d'eau ou le tirant d'eau h_0 déterminé expérimentalement à l'entrée de la mèche. Soit : $x = 0 \quad h = h_0$.

I.1.3.7.2 Résultats obtenus via la relation Stephenson (1979)

On présentera ci-après les résultats de la simulation des expériences réalisées pour les débits 10, 20, 30 et 45 l/s pour un milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=5 cm ayant une porosité n= 0.485.

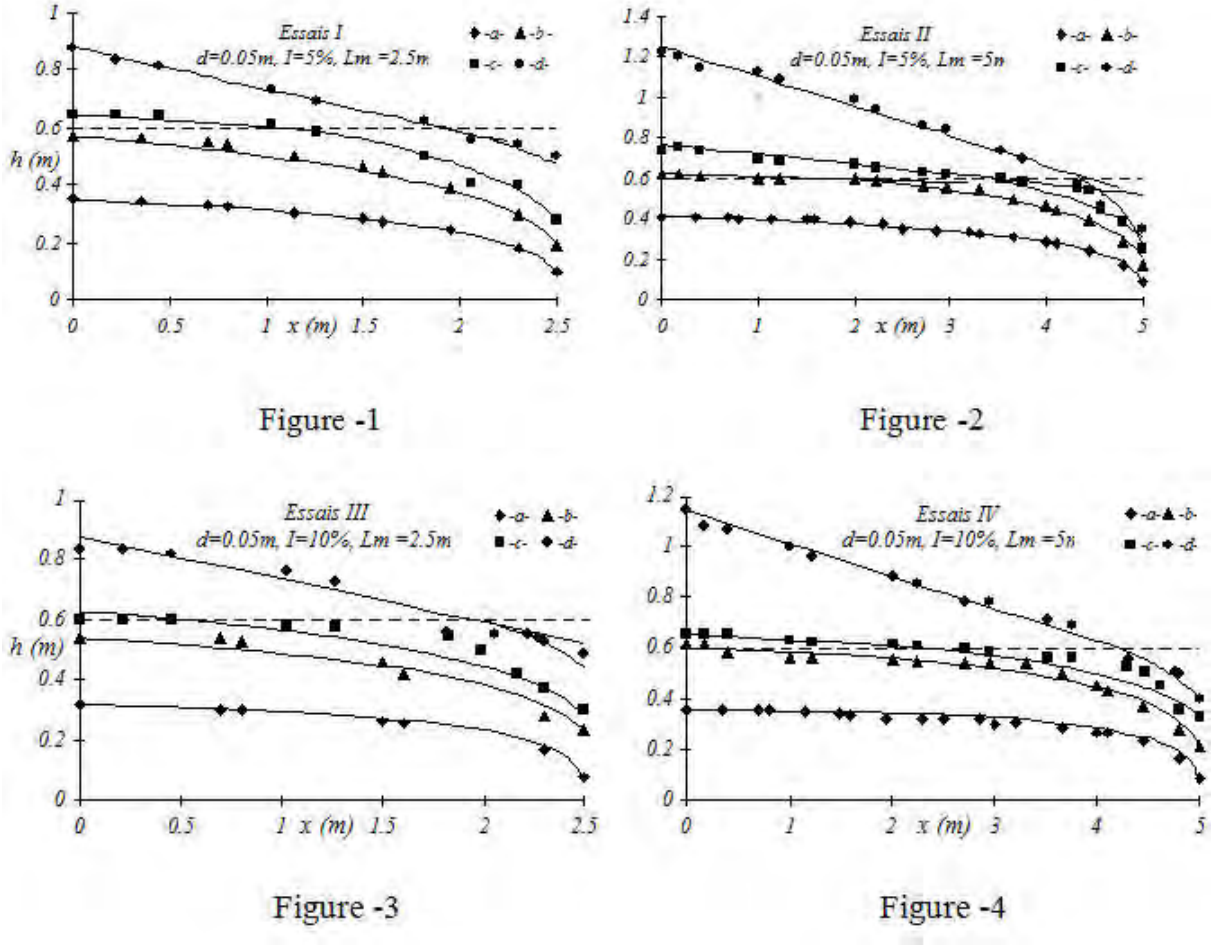


Figure I.1.2 : ESSAIS : I-II-III-IV- Cailloux de diamètre d=0.05m, porosité n=0.485

Les figures I.1.2 correspondent aux essais réalisés avec des cailloux de taille *d=0.05 m*. Chaque graphique correspond à une pente et une longueur de mèche données. Évidemment, on observe que la charge hydraulique augmente avec le débit. Seuls les écoulements à 30 et 45 l/s sont partiellement en charge, avec un effet sensible de la longueur de la mèche à pente fixée. Pour un débit et une pente fixés, l'augmentation de la longueur de mèche entraîne une dissipation d'énergie plus importante dans tout le volume de la mèche et en conséquence un accroissement de la charge hydraulique (et donc de la pression ou du tirant d'eau) à l'entrée de la mèche. Par contre, l'effet de la pente est beaucoup moins sensible. En comparant nos résultats sur les figures 1et 3 d'une part et les figures 2et 4 d'autre part, la pente ne semble pas entrainer de modification sensible de la ligne d'eau. Quand la pente est plus importante, la vitesse augmente, tout comme le gradient hydraulique, mais cet effet est compensé par l'augmentation de la vitesse et donc du tirant d'eau. Ceci explique que les courbes *h(x)* sur les figures 1et 3 soient très proches les unes des autres.

En conclusion, l'examen de l'ensemble des résultats expérimentaux indique des évolutions prévisibles de la pression ou de la ligne d'eau le long de la mèche en fonction des paramètres caractéristiques de la structure de la mèche et des paramètres hydrodynamiques.

L'augmentation de la dimension de la taille caractéristique *d* et de la porosité *n* a pour effet de diminuer la perte de charge. Les écoulements à débits imposés mettent en jeu des charges hydrauliques plus faibles lorsque le diamètre des particules augmente. La diminution de la longueur de la mèche a des effets similaires. Par contre, pour les deux pentes de 5 et 10% étudiées, les lignes d'eau sont très proches.

Le premier constat qu'indiquent les profils de la ligne d'eau est que dans les écoulements à surface libre, la loi de Stephenson permet de reproduire l'évolution observée le long de la mèche à condition d'ajuster la valeur de la constante d'angularité $K_{t(sl)}$ pour chaque débit.

Cependant, le résultat de ces ajustements est que la constante d'angularité $K_{t(sl)}$ est très variable et elle sera d'autant plus grande que le débit est faible et/ou que les cailloux sont de petite dimension *d*. Ces conclusions sont bien mises en évidence par les figures 2 qui présentent, en fonction du débit, les valeurs de $K_{t(sl)}$ obtenues dans les simulations numériques de l'ensemble des expériences mises en œuvre sur le canal de l'INAT.

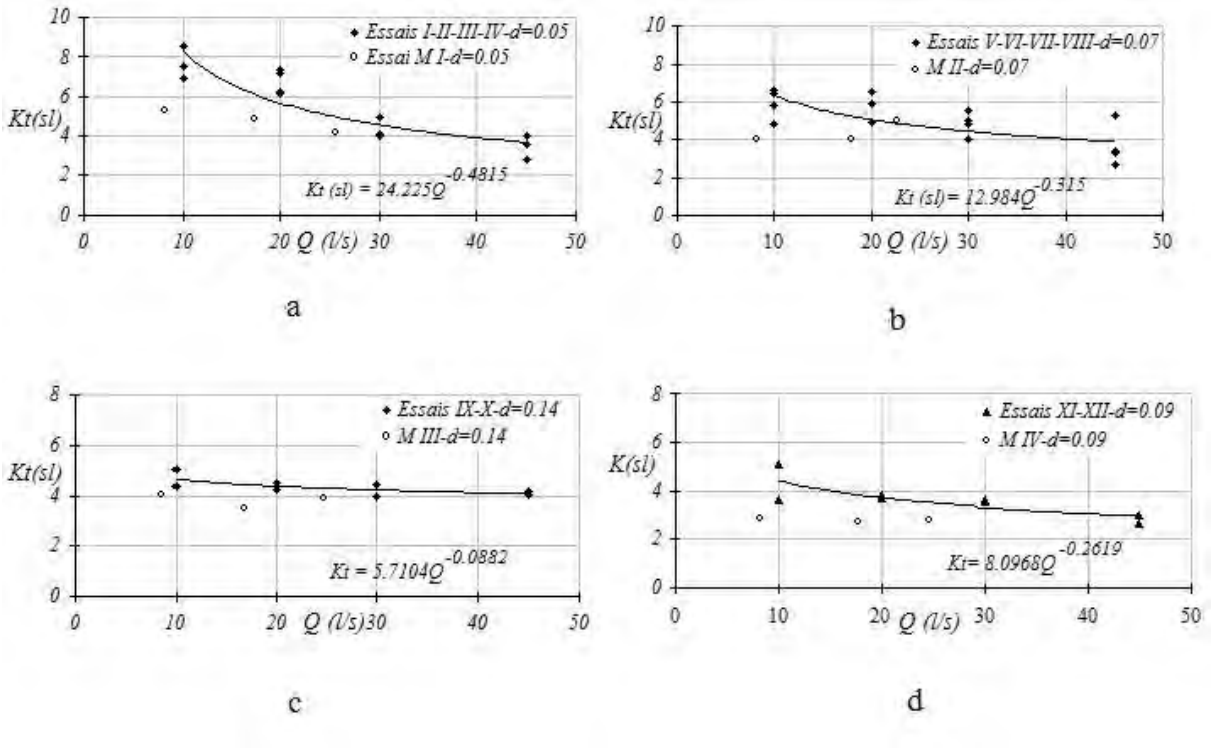


Figure I.1.3 : Valeurs de la constante d'angularité obtenues pour l'ensemble des essais à surface libre en fonction du débit et pour chaque classe de matériau

Ces figures montrent que pour les simulations aux faibles débits, l'augmentation du paramètre d'angularité est d'autant plus sensible que la taille des cailloux est petite. Ces évolutions semblent indiquer une inhomogénéité de la mèche suivant la profondeur. On peut l'expliquer ainsi. Le nombre de Reynolds va continument varier le long de la ligne d'eau (conservation du débit mais réduction de la section de passage de l'écoulement). Donc, la constante d'angularité devra être ajustée pour répondre à ces variations. La prendre constante, comme stipulé par Stephenson (1979) pour une expérience apparaît donc comme une hypothèse forte et ne serait valable que pour des cas où la hauteur de la ligne d'eau ne varie que peu entre l'entrée et la sortie de la mèche. De nombreux auteurs se sont attachés à définir un modèle d'écoulement à grand nombre de Reynolds dans les milieux poreux. Si le nombre de Reynolds dépasse 5, on ne peut plus négliger les effets non linéaires, dans la dépendance vitesse – pression. Ceux-ci deviendront sensibles même si l'écoulement est encore laminaire, et seront même dominants quand l'écoulement deviendra turbulent.

I.1.4 Étude de la perméabilité dans les milieux hétérogène de grande porosité

La perméabilité du milieu poreux est une propriété hydraulique critique et présente une très large gamme de valeurs dans les milieux naturels. Ce paramètre est défini généralement par la loi de darcy ce qui suppose une évolution linéaire de la vitesse en fonction du gradient hydraulique. Cette loi n'est applicable que pour des faibles nombres de Reynolds. Pour des écoulements à grande vitesse, il y a une dominance des forces inertielles et la vitesse n'évolue plus linéairement avec le gradient hydraulique. La perméabilité d'un milieu poreux est souvent mesurée au laboratoire mais dans le cas des matériaux très perméables, ces mesures peuvent être compliquées à réaliser et difficiles à interpréter. En effet, la procédure expérimentale peut introduire une incertitude dans l'estimation de la perméabilité, beaucoup de facteurs comme la vitesse de l'écoulement, la pression, les propriétés du fluide, l'effet de paroi…peuvent aussi fortement influencer les résultats (Yi Wang *et al.* 2010). Dans ce qui suit, on présente les méthodes de calcul de ce paramètre existantes dans la littérature.

I.1.4.1 La perméabilité de Kozeny Carman (1937)

La théorie du gradient hydraulique de Kozeny et Carman (1937) est la théorie la plus utilisée pour la détermination de la perméabilité dans le cas d'un écoulement laminaire (Darcéen) par la relation suivante Francisco *et al.* (2009) :

$$k = \frac{n^3}{\kappa(1-n)\eth} \tag{19}$$

Avec : $\eth$ est la surface des particules solides par unité de volume, et κ est la constante de Carman.

Le diamètre moyen des particules pour $\eth$ est exprimé par la relation suivante :

$$d = \frac{6}{\sqrt{\eth}} \tag{20}$$

En intégrant d dans l'équation (19), on obtient :

$$k_d = \frac{n^3 d^2}{36\kappa(1-n)^2} \tag{21}$$

Pour des particules sphériques $\kappa = 5$, ce paramètre est fonction de de la tortuosité, en effet, pour un milieu poreux donné, la constante de Kozeny Carman κ augmente avec l'augmentation de la porosité n, (Dukhan *et al.* 2014).

La perméabilité utilisée dans la relation de perte de charge d'Ergun(1952) est celle de Darcy(1856). Elle est exprimée par la relation de Kozeny et Carman (1937), comme reportée dans l'équation (21).

Dans cette relation, on note la dépendance de la perméabilité, à la porosité, et au diamètre moyen des particules. On note la présence d'un coefficient multiplicatif qui est souvent une variable à ajuster ou déterminer.

Elle est notée A pour la relation d'Ergun(1952) et $\frac{1}{36\kappa}$ pour celle de Kozeny Carman (1937). Cette dernière relation relie ce coefficient à la surface de la phase solide qui participe directement dans la contrainte de cisaillement visqueuse d'un écoulement dans un milieu poreux. Ce coefficient n'est pas constant et n'est pas universel. On peut aussi noter qu'il est absent dans la relation de Forchheimer (1901) et celle de Barrée et Conway (2004).

D'autres auteurs (Wang et al. (2013), Soulaine (2012), Sano et al (2009), Wang (1998), Durlovsky (1991)) utilisent des méthodes numériques diverses pour étudier l'anisotropie des milieux. Ceci est fait en interprétant des calculs directs et ainsi estimer les valeurs des coefficients du tenseur de perméabilité et l'influence des termes inertiels ou de la turbulence sur les propriétés de transport.

I.1.4.2 La méthode de Barree et Conway (2004) pour le calcul de la perméabilité apparente

Des nouvelles expériences réalisées par Barree et Conway (2004) dans des conditions d'écoulements inertiels prouvent que la relation de Forchheimer (1901) présente des limites d'application.

Dans leur modèle généralisé pour la détermination de la perte de charge pour des écoulements inertiels dans les milieux poreux, Barree et Conway (2004) ont opté pour un estimateur d'une relation de perméabilité apparente en se basant sur la relation de Forchheimer (1901). En effet, la relation de Forchheimer (1901) peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial \vec{p}}{\partial L} = \frac{\mu \vec{V}}{k_d}\left(1 + \frac{\beta k_d \rho \vec{V}}{\mu}\right) \tag{22}$$

Le deuxième terme dans la parenthèse est le nombre de Reynolds où le terme βk_d a la dimension d'une longueur. En utilisant cette forme d'équation, le gradient de pression peut être défini en fonction d'une perméabilité apparente si on la remet sous la forme suivante:

$$k_{app} = \frac{k_d}{(1 + R_e)} \tag{23}$$

Mais, puisque β n'est pas une constante, cette forme de l'eq 23 ne permet pas de reproduire de manière satisfaisante la relation vitesse/perte de charge. Barree et Conway (2004) expliquent alors qu'il est nécessaire de réécrire la relation (23) en introduisant une loi puissance telle que suit :

$$k_{app} = k_{min} + \frac{(k_d - k_{min})}{(1 + R_e^F)^E} \tag{24}$$

Si les deux exposants E et F valent 1 et la valeur de k_{min} est égale 0. On obtient alors l'équation (23). Pour modéliser correctement le comportement non linéaire de l'écoulement, la valeur de Re peut être exprimée en termes de rapport de $\frac{\rho V}{\mu}$ divisé par T. Elle peut être déterminée par régression non linéaire des données de perméabilité apparente obtenues au laboratoire.

$$R_e = \frac{\rho V}{\mu T} \tag{25}$$

Barrée et Conway (2004) ont tracé la courbe de la perméabilité apparente en fonction du nombre de Reynolds dans un graphe log-log. Un algorithme de régression non linéaire est utilisé pour déterminer les trois inconnues k_d, k_{min} et T. La figure suivante présente les résultats obtenus :

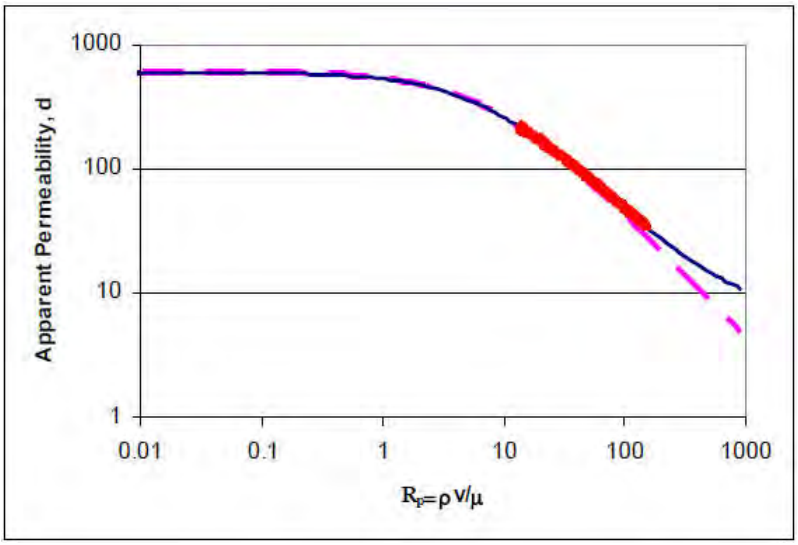


Figure1.1.4 : Courbe logarithmique adaptée à des données de laboratoire ; le nombre de Reynolds en fonction de la perméabilité apparente (Barree et Conway 2004)

Cette figure montre que pour des écoulements à faible nombre de Reynolds et pour un écoulement transitoire, la valeur de la perméabilité apparente est une constante. Pour des valeurs plus importantes du nombre de Reynolds, la perméabilité apparente calculée par la relation de Barree et Conway (2004) (la courbe bleue) présente une déviation par rapport à la ligne magenta représentant la perméabilité de Forchheimer. Cette déviation est déterminée par la valeur minimale de la perméabilité k_{min} différente de 0. La courbe rouge présente les valeurs expérimentales de la perméabilité.

I.1.5 Exemple d'expériences réalisées dans la littérature

Dukhan *et al*. (2014) ont réalisé des expériences avec trois milieux poreux dont deux milieux sont constituée de sphères compactées ayant les deux diamètres moyens d=1mm et d=3mm, et des porosités de 0.35 et 0.355. Les expériences consistaient à remplir un tuyau en acier inoxydable de diamètre de 51,4 mm et de longueur de 304 mm. Deux grilles métalliques ont été installés aux deux extrémités du milieu poreux afin de maintenir les billes en place. Le tube a été vigoureusement secoué après son remplissage afin de s'assurer que les sphères étaient uniformément emballées sans vides excessifs.

Sur les deux côtés de la section d'essai, des tubes en polyéthylène de 51,4 mm de diamètre et de 200 mm de long étaient fixés. Les sorties des tubes en polyéthylène étaient reliées à des tuyaux en acier inoxydable de 32 mm de diamètre et de 110 cm de longueur. La sortie du

tuyau situé en aval du milieu poreux est reliée à un réservoir de 50 litres pour collecter l'eau sur une durée connue pour mesurer les débits. La section d'essai est alimentée par un réservoir en plastique surélevé (3,5 m) de diamètre 41 cm et de hauteur 44 cm avec un réseau de tuyaux et de vannes, garantissant une hauteur d'eau constante de 33,2 cm dans le réservoir. Les vitesses d'eau obtenues ont été très faibles de l'ordre de $7,6 \times 10^{-5}$ m / s. Pour atteindre des débits d'écoulements élevés, une deuxième pompe a été utilisée, générant des vitesses moyennes allant jusqu'à environ 0,62 m/s. Un schéma représentatif du dispositif expérimental utilisé est donné ci-après.

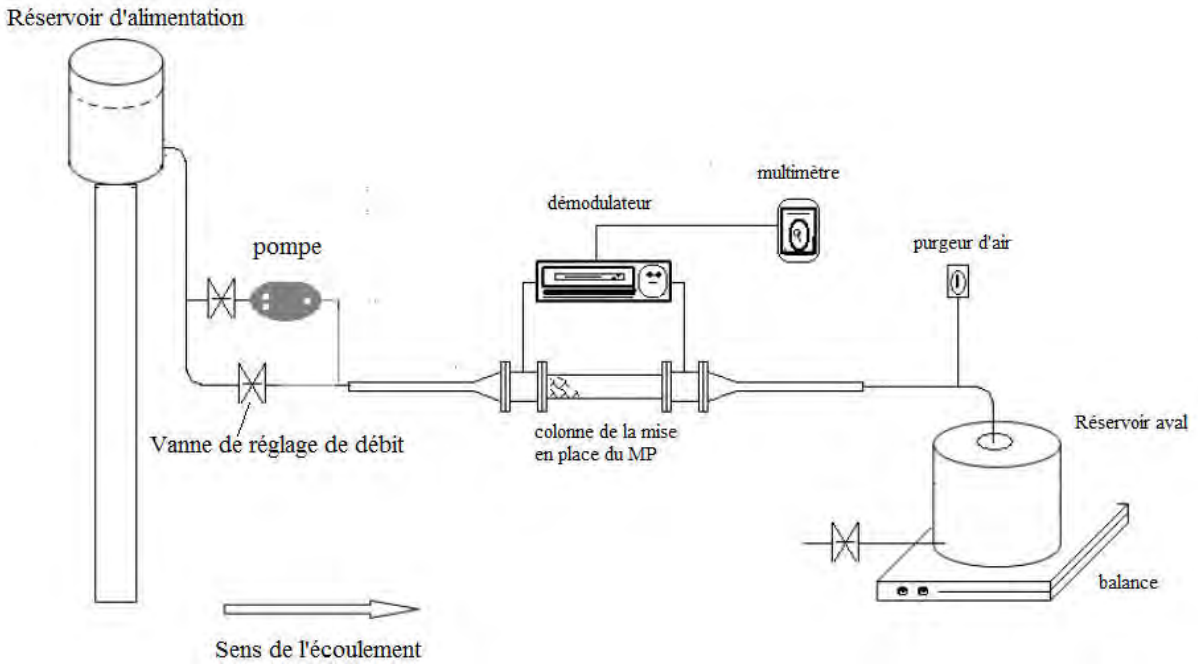


Figure I.1.5 : Schéma de dispositif expérimental (Dukhan *et al.* 2014)

Dans leur étude, Dukhan *et al.* (2014) ont comparé la relation de Forchheimer (1901) et celle d'Ergun (1952). Nous allons présenter leurs résultats en les comparants avec les nôtres dans le chapitre de modélisation.

I.2 Chapitre 2

Installations expérimentales et moyens de mesures

I.2.1 Introduction

On présente dans ce chapitre les détails des différents dispositifs expérimentaux et des matériels utilisés durant la thèse.

Pour la partie hydrodynamique, on a utilisé le grand canal et le perméamètre conçu et construit à l'INAT pour notre travail, ainsi que le perméamètre conçu et construit à l'IMF Toulouse. Comme moyens de mesure, on a utilisé un débit-mètre, des piezomètres, un anémomètre à fil chaud, et un enregistreur de pression.

I.2.2 Le grand canal de l'INAT

I.2.2.1 Description de l'installation expérimentale

Il s'agit d'un canal rectangulaire, de largeur l = 0.8m, de hauteur h=0.6m, et de longueur L=10m. Les parois latérales sont en verre pour permettre l'observation de l'écoulement. Le haut du canal est couvert des tôles démontables avec quelques fenêtres en verre, à travers lesquelles se font le remplissage et la vidange des enrochements. Le tout est en équilibre sur des supports métalliques. La pente du canal varie entre 0 et 15%, et le réglage de cette dernière se fait en variant la hauteur des supports. L'amont du canal est relié à un réservoir de capacité $4m^3$, par l'intermédiaire de caoutchouc flexible, ce qui permet d'atteindre de fortes pentes. À l'intérieur de ce réservoir une grille à nid d'abeille, est placée horizontalement, elle joue le rôle d'un filtre et d'un tranquiliseur pour l'écoulement. Le canal se déverse à l'aval dans un bac d'une capacité de $9m^3$. L'aval du canal peut être fermé (entièrement ou partiellement) par une vanne glissière pouvant permettre d'obtenir un écoulement en charge. Le canal est alimenté par un circuit fermé constitué de quatre pompes centrifuges approvisionnant un réservoir surélevé. La conduite d'amenée au canal est équipée d'un débitmètre électromagnétique permettant la mesure du débit. L'eau sera pompée à partir du bac aval par ce groupe de quatre électropompes, (dont trois produisent un débit de 10 l/s et la quatrième donne un débit de 15 l/s) vers le réservoir amont qui alimente le canal. Afin d'éviter la mobilité des enrochements, l'entrée et la sortie de la mèche sont fermées par deux grillages.

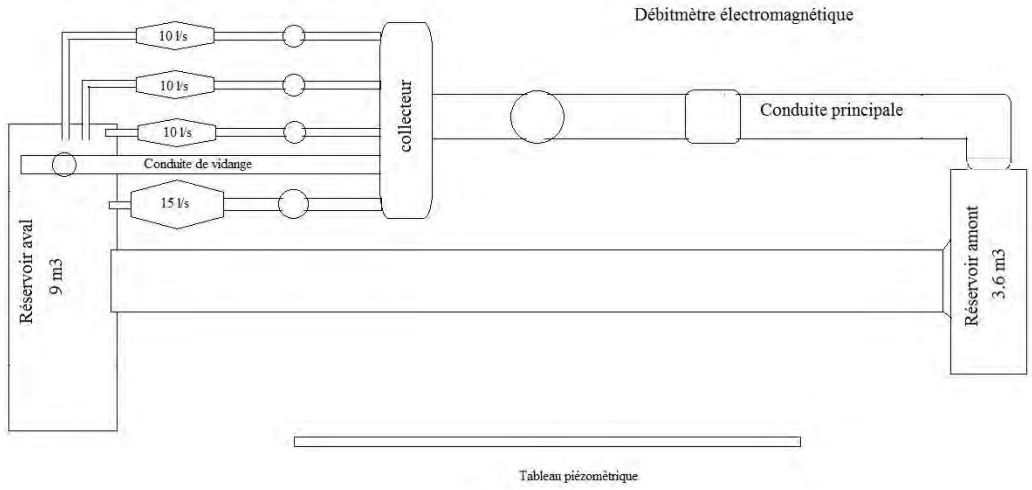


Figure I.2.1 : Schéma représentatif du grand canal de l'INAT (vue de dessus)

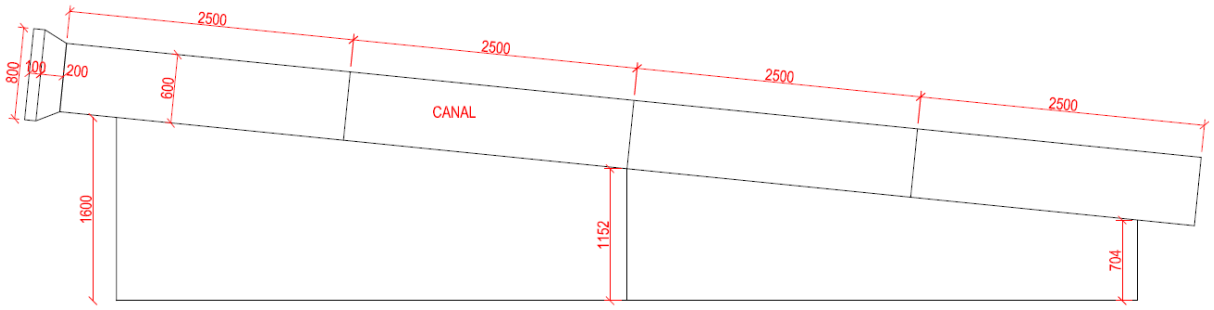
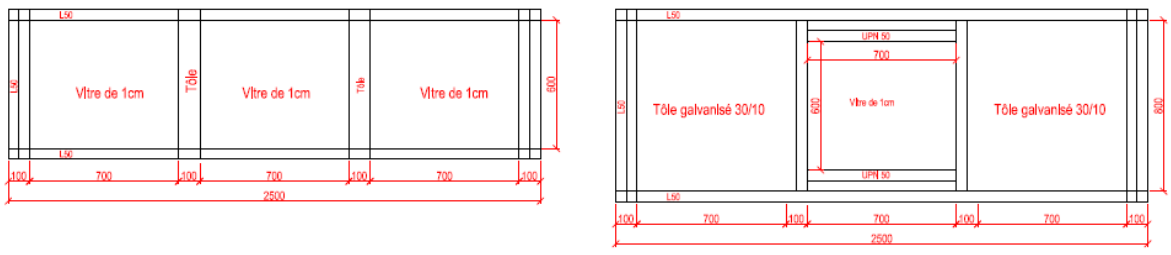


Figure I.2.2 : Schéma du canal. Pour information, le joint en caoutchouc est aussi représenté en entrée du canal (vue de profil)



(a) (b)

Figure I.2.3 : Schéma des vitres (a) et des couvercles du canal (b)

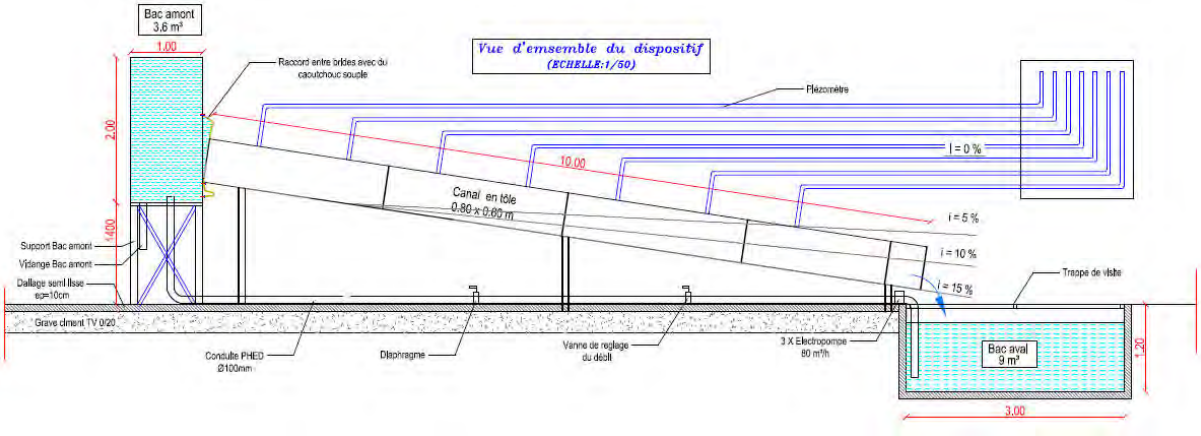


Figure I.2.4: Schéma du dispositif expérimental (vue de profil) – Grand canal de l'INAT

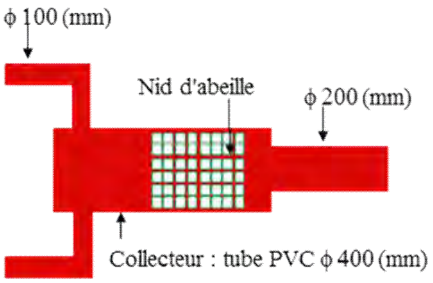


Figure I.2.5 : Détail du collecteur du grand canal de l'INAT



Figure I.2.6 : Photo du canal construit au laboratoire 'LSTE' de l'INAT



Figure I.2.7 : Grillage utilisé pour fixer les enrochements dans le grand canal de l'INAT



Figure I.2.8 : Le groupe des électropompes du grand canal de l'INAT

I.2.2.2 Les appareils de mesure

La mesure du débit se fait par un débitmètre électromagnétique branché au niveau de la conduite principale qui alimente le réservoir amont.

Pour la mesure des niveaux d'eau à travers le milieu poreux lors des essais, dix-sept piézomètres sont incorporés le long du canal au niveau de sa face inférieure. Les espacements entre les piézomètres sont de 0.5m.

En plus des mesures par les piézomètres, on a relevé la ligne d'eau pour chaque expérience par lecture directe sur les vitres.

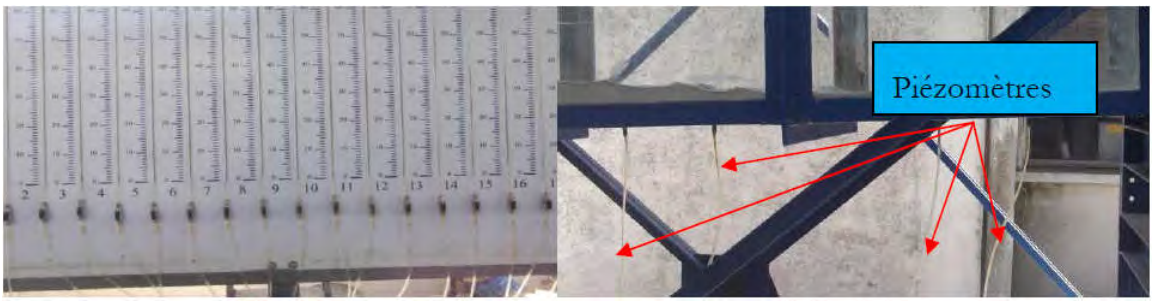


Figure I.2.9 : Photo du tableau des piézomètres utilisés pour la mesure de la perte de charge dans le grand canal de l'INAT

a. Principe de fonctionnement du débitmètre électromagnétique

Le débitmètre utilisé durant nos expériences dans le grand canal de l'INAT est un débitmètre électromagnétique de type Krohne OPTIFLUX 2000, branché au niveau de la conduite principale.

Un fluide conducteur coule à l'intérieur du tube de mesure isolé électriquement et y traverse un champ magnétique. Ce champ magnétique est généré par un courant qui traverse une paire de bobines de champ. Une tension U est alors induite dans le fluide.

$$U = V F I D \quad (26)$$

Dans laquelle :

V = vitesse moyenne d'écoulement

F = constante de correction pour la géométrie

I = intensité du champ magnétique

D = diamètre intérieur du capteur de mesure

Le signal de tension U, proportionnel à la vitesse moyenne d'écoulement V et donc au débit Q, est capté par des électrodes. Un convertisseur de mesure amplifie ensuite le signal de la tension mesurée, le filtre, puis le transforme en signaux normalisés pour l'enregistrement et le traitement.



Figure I.2.10 a) Débitmètre électromagnétique Krohne OPTIFLUX 2000, b) système électromagnétique associé

I.2.3 Le perméamètre de l'INAT

I.2.3.1 Le dispositif expérimental

Il s'agit d'un perméamètre cylindrique alimenté en bas par une conduite auxiliaire reliée à la conduite principale du grand canal décrit dans la section précédente. Il est donc alimenté par les quatre pompes, mené d'un cône de divergence.

Le perméamètre est constitué d'un tube de section circulaire, de diamètre Φ=60 cm, de hauteur 1 m, en PVC opaque. Il est alimenté par le bas, à partir de la conduite principale d'alimentation du grand canal, par un tube de diamètre 10 cm, muni d'une « vanne amont » de réglage de débit. Par ailleurs, afin de tranquilliser l'entrée d'eau dans le perméamètre, un cône divergent, muni d'une grille de tranquillisation, est installé à la base de ce dernier.

Le débit est mesuré à la sortie du perméamètre en collectant un certain volume durant un certain temps de remplissage. Notons que le milieu poreux est maintenu entre deux grilles, la grille du dessus étant escamotable pour permettre le remplissage en cailloux du perméamètre.

Les détails de ce perméamètre sont présentés dans les figures I.2.11 et I.2.12.

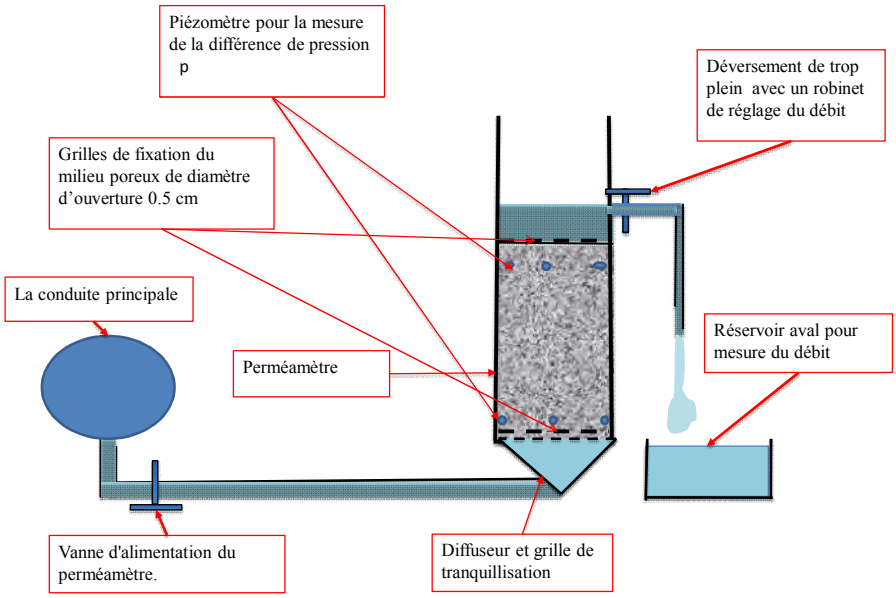


Figure I.2.11 : Représentation schématique du perméamètre de l'INAT



Figure I.2.12 : Photos du perméamètre conçu à l'INAT

I.2.3.2 Appareil de mesure

Les deux paramètres que l'on mesure pour les expériences réalisées dans le perméamètre de l'INAT sont la différence de pression et le débit de l'écoulement. Le premier paramètre se détermine par mesure de la différence de charge entre les piezomètres installés à l'entrée et à la sortie du milieu poreux, on prélève donc pour chaque débit le niveau piezomètrique.

Le calcul de débit, est réalisé par mesure du temps nécessaire pour remplir un volume de 80l correspondant au volume du réservoir installé à côté du perméamètre.

I.2.4 Le perméamètre de l'IMFT

I.2.4.1 Le dispositif expérimental

Il s'agit d'un perméamètre cylindrique de diamètre =67 cm et de longueur L=65 cm alimenté en bas par un ventilateur donnant un débit maximal Q=80m^3/h, Ce ventilateur est attaché à un divergent pour assurer la répartition de l'air sur la surface du milieu poreux.

En utilisant ce ventilateur, le premier perméamètre avec une telle section ne nous a pas permis d'atteindre de grandes vitesses d'écoulement, d'où l'idée d'utilisé un deuxième ventilateur et de construire un deuxième perméamètre cylindrique ayant un diamètre de 10 cm et une longueur de 100 cm. Ce dernier est alimenté en bas par le un deuxième ventilateur. Ce dernier donne un débit de 200 m^3/h.



Figure I.2.13 : Photos du grand perméamètre de l'IMFT



Figure I.2.14 : Perméamètre à petite section de l'IMFT



Figure I.2.15 : Enregistreur de la variation de pression



Figure I.2.16 : Anémomètre a fil chaud utilisé pour la mesure de la vitesse d'écoulement

I.3.Chapitre 3

Expériences réalisées

I.3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le protocole des expériences réalisées sur la partie hydrodynamique et les résultats correspondants. Nous allons commencer par présenter les expériences complémentaires réalisées dans ce travail sur la partie hydrodynamique. Cela éclaircira certaines interprétations faites antérieurement (pendant et après mon mastère) dont un bref aperçu des résultats a été fait dans le chapitre introductif.

I.3.2 Expérimentations réalisées sur la partie hydrodynamique

I.3.2.1 Protocole des expériences réalisées

Les expériences consistent à étudier les écoulements dans les enrochements placés au centre du canal (après lavage) sur une longueur de 3 m. Le débits d'écoulement Q, varie entre 6 et 44 l/s. Ceci est reproduit pour les deux tailles des enrochements dont nous disposons. Pour chaque essai, on mesure le débit, et l'évolution de la ligne d'eau dans les enrochements. On dispose de deux tailles d'enrochements anguleux, dont on a déterminé leurs porosités au laboratoire, à savoir :

- des enrochements de diamètre moyen d=1 cm et, de porosité n=0.45
- des enrochements de diamètre moyen d=15 cm, de porosité n=0.468



Figure I.3.1 : Les deux types de cailloux utilisés

I.3.2.2 Résultats expérimentaux de la ligne d'eau

On présente ici les instantanés réalisés lors des expériences faites avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm ; il s'agit des résultats d'écoulements à surface libre et en charge avec des débits allant de 4 à 22 l/s.



Figure I.3.2 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=4l/s



FigureI.3.3 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=6l/s



Figure I.3.4 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=12l/s



Figure I. 3.5 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=14l/s



Figure I.3.6 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=16l/s



Figure I.3.7 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=18l/s



Figure I.3.8 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=1 cm et un débit Q=22l/s

Le tableau suivant résume les caractéristiques de ces essais.

Tableau I.3.1 : Définitions des derniers essais réalisés avec les cailloux de diamètre moyen d=1cm

Diamètre moyen d (m)	Débit Q (l/s)	Longueur de la mèche L (m)	h amont (m)
0.01	4	3m	0.23
	6		0.315
	8		0.411
	10		0.479
	12		0.58
	14		0.595
	16		0.61
	18		0.685
	22		0.695

En plus des expériences réalisées avec des cailloux de diamètre moyen d=1cm, on a réalisé un deuxième volet des expériences avec des cailloux de diamètre moyen d=15cm. Ceci nous permet d'étudier l'effet de changement de diamètre sur l'hydrodynamique dans ce type de milieu. On présente ci-après les photos des expériences réalisées.



Figure I.3.9 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=4l/s



Figure I. 3.10 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=6l/s



Figure I.3.11 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=8l/s



Figure I.3.12 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=10l/s



Figure I.3.13 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=12l/s



Figure I.3.14 : Expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=15 cm et un débit Q=22l/s

Ces photos montrent que, contrairement aux expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=1cm, un milieu poreux constitué de cailloux de diamètre d=15 cm ne permettra pas à l'écoulement d'être en charge pour les débits considérés. Ceci est dû à l'augmentation de la perméabilité, qui, à débit constant, engendre une baisse des pertes de charges.

On a regroupé les caractéristiques des expériences réalisées avec des cailloux de diamètre moyen d=15cm dans le tableau suivant.

Tableau I.3.2: les caractéristiques des expériences réalisés avec les cailloux de diamètre moyen d=15cm

Diamètre moyen d (m)	Débit Q (l/s)	Longueur de la mèche L (m)	h amont (m)
0.15	6	3m	0.11
	8		0.135
	10		0.175
	12		0.215
	14		0.235
	16		0.265
	18		0.286

	20		0.305
	22		0.325
	24		0.355
	28		0.418
	32		0.45
	36		0.486
	40		0.515
	44		0.557

Le tableau ci-dessus confirme que pour ce type de milieu poreux on n'a pas obtenu un écoulement en charge. En effet, pour le débit maximal de 44 l/s on a une hauteur d'eau maximale à l'entrée de l'enrochement de 0.557 m.

I.3.3 Expériences complémentaires réalisées dans les perméamètres

Suite aux travaux réalisés lors du mastère, une compréhension plus approfondie de l'hydrodynamique dans les milieux très perméables basée sur l'expérimentation a été proposée. La relation de Stephenson (1979) se base sur des paramètres de calage comme le coefficient d'angularité K_t. D'où la nécessité d'étudier d'autres relations qui se basent plutôt sur des paramètres physiques telle que la relation de Forchheimer (1901). Pour bien étudier le phénomène, il fallait étudier l'évolution de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds. Ainsi trois perméamètres ont été conçus et construits durant cette étude, un à l'INAT et deux autres à l'IMFT, pour mettre en évidence la variation de la perméabilité avec le nombre de Reynolds.

I.3.3.1 Les expériences réalisées dans le perméamètre de l'INAT

Les expériences réalisées dans ce perméamètre avec les deux milieux poreux étudiés (d_1=1cm et d_2= 15 cm) permettaient de déterminer les paramètres utilisés par chaque relation.

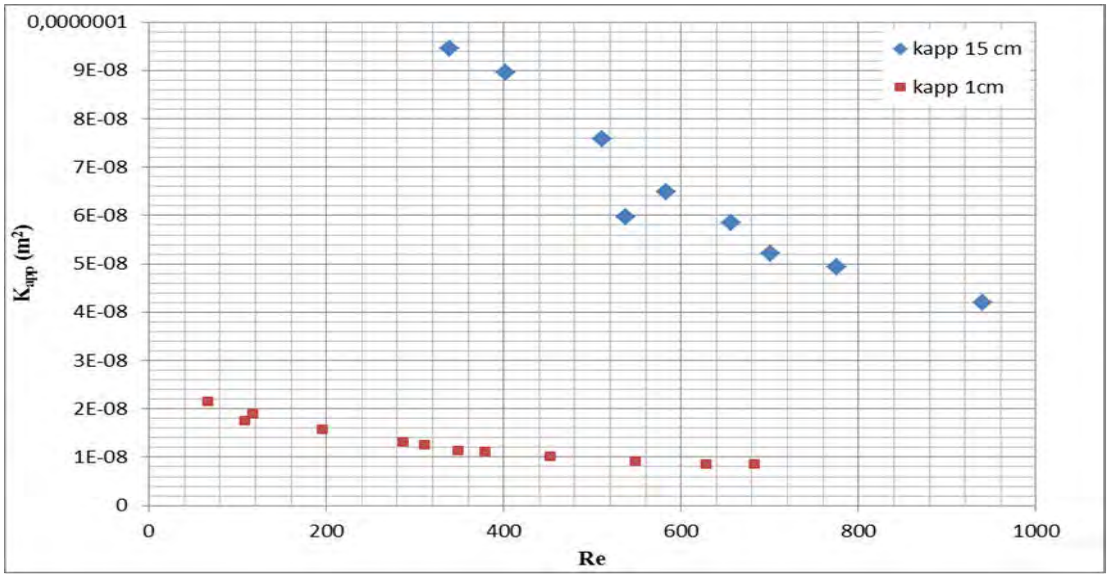


Figure I.3.15 : Résultats expérimentaux du perméamètre conçu à l'INAT : variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds pour les deux essais (d_1=1cm, d_2=15cm)

La figure I.3.15 montre que la perméabilité diminue lorsque le nombre de Reynold augmente. Pour le milieu poreux constitué de cailloux de diamètre moyen d=1cm, le nombre de Reynolds correspondant aux expériences réalisées varie entre 70 et 680 alors qu'il varie entre 320 et 940 pour le second milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d_2= 15cm. Sachant que le régime turbulent dans les milieux poreux est atteint pour un nombre de Reynolds Re≥300, on peut dire que pour les gros enrochements on est dans le régime turbulent, tandis que pour le deuxième milieu poreux (d_1=1cm) on a observé un écoulement transitoire et un écoulement turbulent.

- **Ligne d'eau correspondante à chaque expérience**

Pour les deux expériences réalisées dans le perméamètre avec d_1=1cm et d_2= 15cm, on a obtenu des débits maximales de 8l/s. Par contre dans le grand canal, on a réalisé des expériences avec 4, 6 et 8l/s pour les deux milieux poreux étudiés dont les lignes d'eau correspondantes sont présentées ci-après.

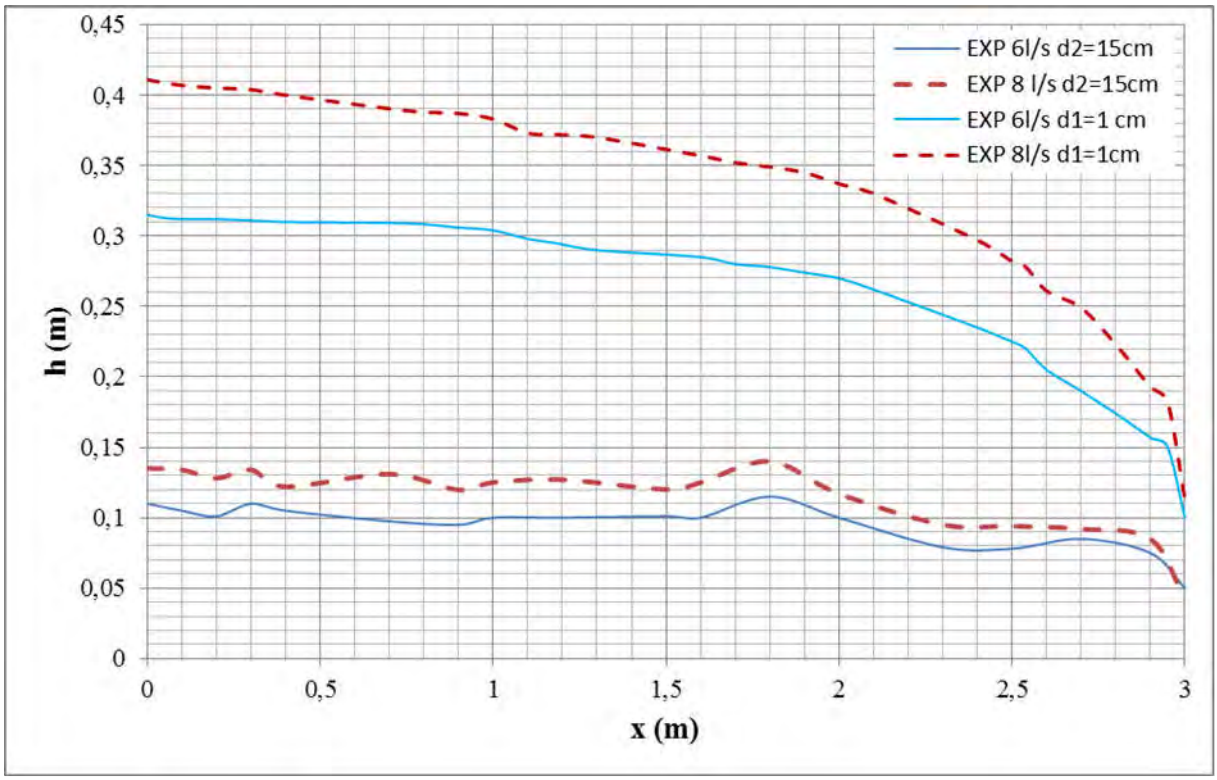


Figure I.3.16 : Ligne d'eau expérimentale pour les deux milieux étudiés (d_1=1cm et d_2=15cm avec les deux débits 6 et 8 l/s

Ces résultats montrent que, pour un même débit, la ligne d'eau dépend des caractéristiques physiques du milieu poreux comme le diamètre des cailloux et donc sa perméabilité. La perte de charge d'un écoulement dans le premier milieu poreux ayant un diamètre moyen des particules d_1=1cm est presque trois fois plus importante que celle observée dans le cas d'un milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d_2=15 cm.

Dans le cadre de cette thèse, on a aussi réalisé des expériences afin d'étudier la variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds dans un deuxième perméamètre conçu et construit à l'IMFT.

I.3.3.2Les expériences réalisées dans les perméamètres de l'IMFT

Une deuxième série des expériences a été réalisée à l'IMFT dans un perméamètre conçu et construit spécialement pour ce travail pour étudier les écoulements dans un milieu homogène constitué de billes, et un autre milieu constitué de cailloux, les deux milieux ont un diamètre moyen des particules d=1cm.

1.3.3.2.1 Dispositif expérimental et résultats

Dans ces deux perméamètres de l'IMFT, on a réalisé des expériences avec deux types de milieux poreux ; des billes et des cailloux de diamètre moyen d=1cm dont l'objectif est d'étudier l'effet de la rugosité des particules sur l'écoulement. Une comparaison de ces résultats avec ceux, qui ont été réalisées dans le grand canal de l'INAT avec des cailloux de diamètre moyen d=1cm a été effectuée.

a Expériences avec les billes

Le premier milieu poreux étudié est formé par des billes homogènes de diamètre d=1cm disposées sur une longueur de 64 cm dans le grand perméamètre. La porosité de ce milieu est n=0.402. Le principe de l'expérience consiste à modifier le débit d'air injecté et mesurer à chaque fois la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la mèche. Les premières mesures nous ont permis de tracer la courbe de la variation de perméabilité en fonction du nombre de Reynolds dans le grand perméamètre avec le petit ventilateur (figure I.3.17) par la méthode suivante :

Détermination de la perméabilité

La perméabilité k est déterminée par la loi de Darcy sous la forme :

$$K = \frac{\mu V}{\Delta p / \Delta x} \qquad (27)$$

μ est la viscosité dynamique de l'air : 1.85×10^{-5} ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)

V est la vitesse de l'écoulement mesurée (m/s)

Δp est la perte de charge mesurée entre l'entrée et la sortie du milieu poreux

Donc, on a obtenu les courbes de variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds pour les billes.

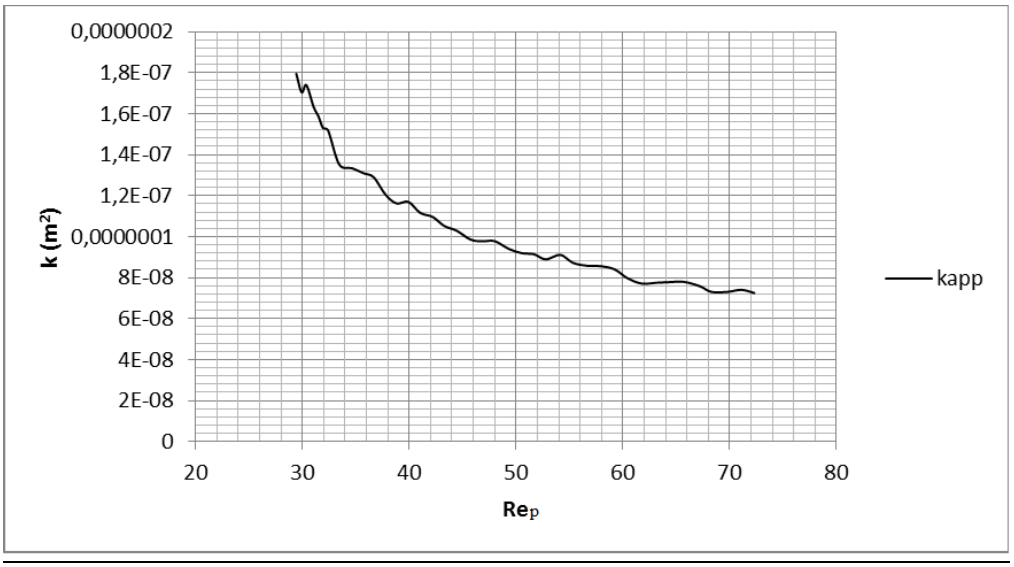


Figure I.3.17 : Résultats expérimentaux de la variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds fans les pores pour le milieu poreux constitué de billes et pour les débits obtenus avec le petit ventilateur dans le grand perméamètre

Le nombre de Reynolds dans les pores pour ces expériences varie entre 28 et 74. On n'est donc pas dans le régime d'écoulement de Darcy. La perméabilité varie en fonction du nombre de Reynolds. En effet, elle diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Ceci a été expliqué dans le chapitre introductif (voir page 24).

Calcul de l'incertitude sur les valeurs mesurées de p

Afin de s'assurer du bon fonctionnement de notre dispositif expérimental, on a étudié la marge d'erreur des mesures effectuées pour la différence de pression sur les valeurs de la perméabilité, et on a obtenu les résultats suivants :

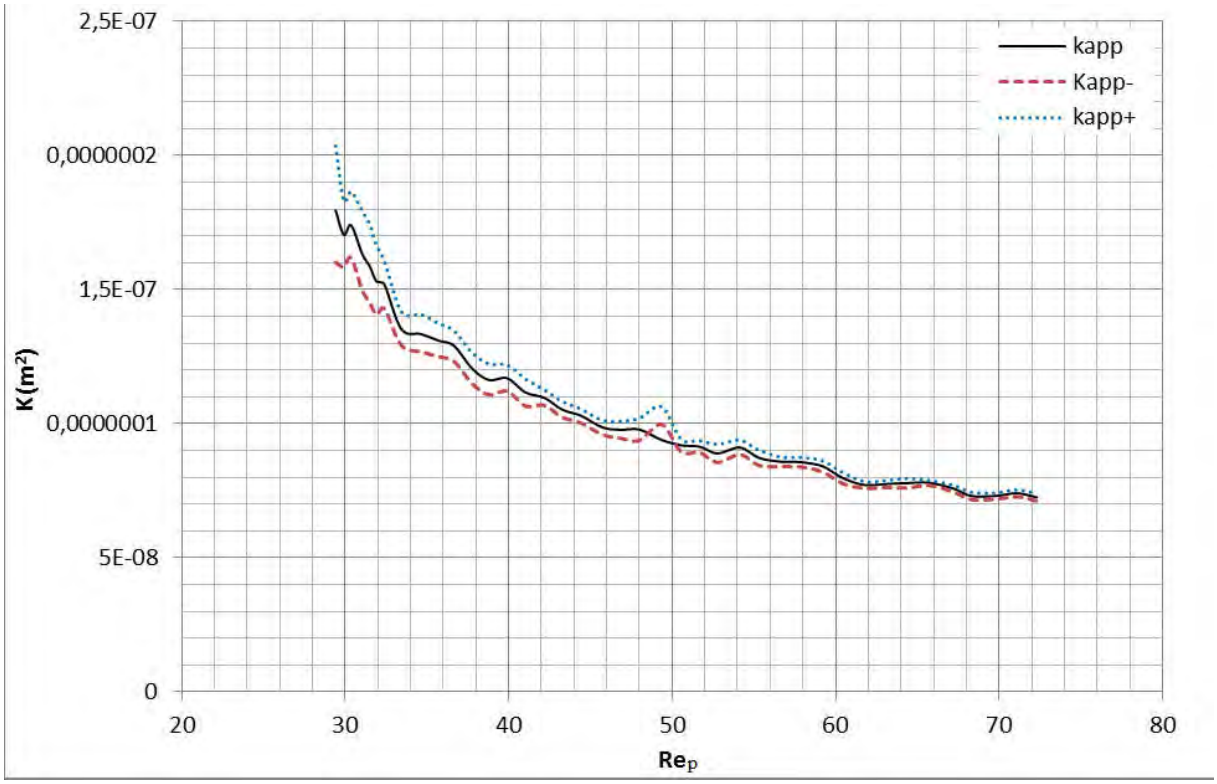


Figure I.3.18 : écart type par point de perméabilité en fonction des mesures pour le milieu poreux constitué de billes et pour les débits obtenus avec le petit ventilateur dans le grand perméamètre.

Le trait pointillé présente les résultats avec addition de l'écart type sur les mesures de p et le trait discontinu présente les résultats avec soustraction de l'écart type sur les mesures de p, La figure I.3.18 montre donc un leger écart pour les faibles nombre de Reynolds jusqu'à Re_p=40, et à partir de cette valeur l'écart diminue progressivement pour les grands nombres de Reynolds.

Ces résultats montrent donc un bon fonctionnement du dispositif expérimental avec un écart négligeable surtout pour les nombres de Reynolds dans les pores Re_p> 40 de l'ordre de 4.10^{-9} m² ce qui n'affecte que peu les résultats.

Comme le montre le graphe de la figure I.3.17, le petit ventilateur a donné des écoulements avec un nombre de Reynolds maximal de 73, ce qui nous a conduit à réaliser des expériences avec un grand ventilateur. On a commencé par la détermination de la vitesse par mesure avec l'anémomètre à fil chaud au centre du perméamètre, et on a obtenu les résultats suivants.

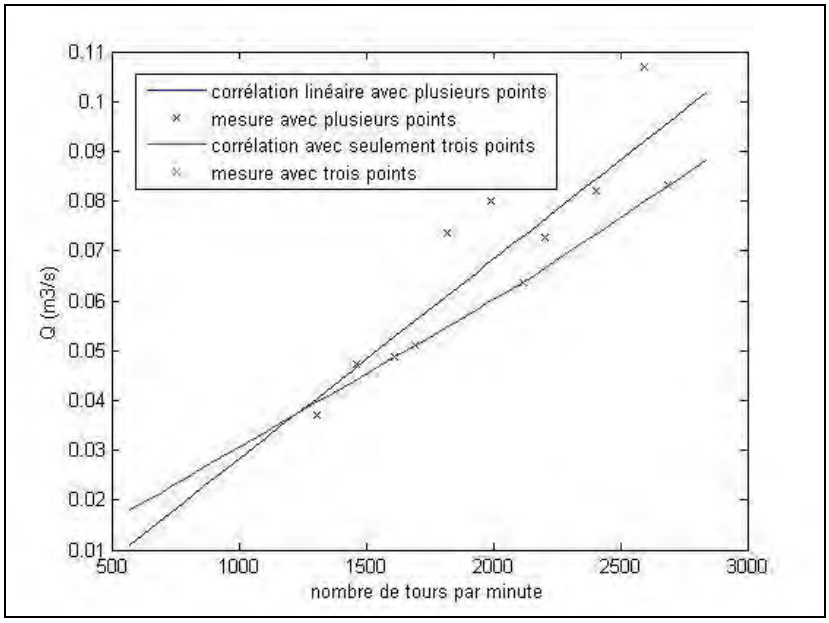


Figure I.3.19 : Détermination du débit en fonction du nombre de tour dans le grand perméamètre de l'IMFT avec le grand ventilateur

D'après la figure I.3.19, on peut remarquer qu'avec ce grand ventilateur on a pu avoir des écoulements avec des débits plus importants, le débit maximal obtenu est de l'ordre de Q=0.11 m^3/s. Sur la figure suivante, on représente la variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds Re_p obtenue pour les expériences réalisées dans les deux perméamètres.

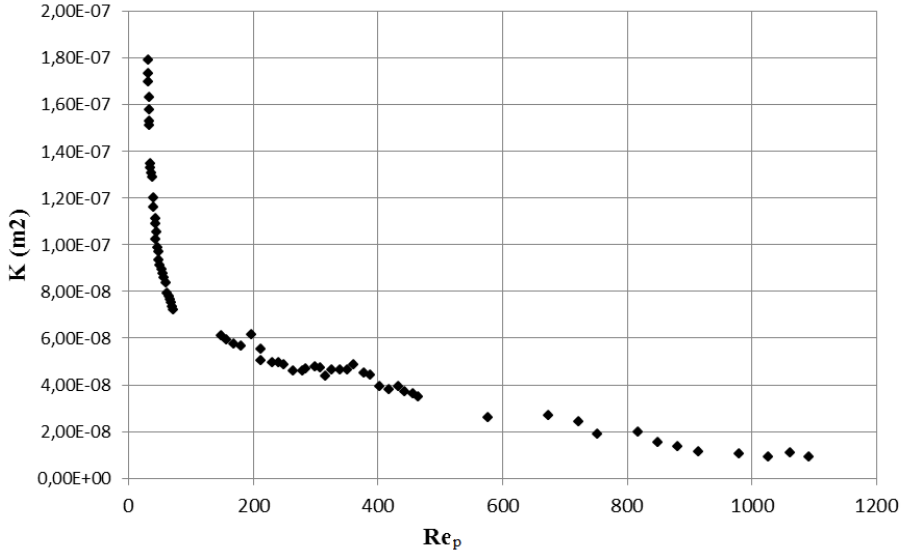


Figure I.3.20 : variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds pour le milieu poreux constitué des billes dans les perméamètres de l'IMFT

Avec le grand ventilateur on a atteint un nombre de Reynolds dans les pores de 400 et une perméabilité de $K=0.99x10^{-7}(m^2)$ pour $Re_p=80$ et $K=0.3x10^{-7}(m^2)$ pour $Re_p=400$. Mais l'écoulement turbulent n'est toujours pas assez développé, on a donc construit un autre perméamètre avec un diamètre de 10 cm afin d'atteindre des nombres de Reynolds plus importants en diminuant éventuellement la section de l'écoulement.

Dans ce deuxième perméamètre, on a rempli une hauteur de 70cm avec des billes, et on a installé le grand ventilateur en bas. De même, pour chaque nombre de tours, on enregistre la variation de la pression nous permettant ainsi de calculer la courbe de variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds dans les pores. On a donc obtenu le graphe ci-dessus.

Comme on peut l'observer, ce deuxième perméamètre avec sa section rétrécie par rapport au premier nous a permis d'atteindre des nombres de Reynolds plus élevés de l'ordre de 10^3.

La perméabilité est très inférieure à celle obtenue dans le grand perméamètre $1.5.10^{-8}<k<1.8.10^{-7}$ (m^2) pour $36<Re_p<1100$ sachant que ces deux paramètres sont inversement proportionnels.

b Expérience avec les cailloux

En plus des expériences réalisées avec les billes en verre, d'autres ont été réalisées avec des cailloux de diamètre moyen d=1cm. L'objectif est de visualiser l'effet de forme ainsi que de la rugosité des particules constituant le milieu poreux sur la variation de la perméabilité.

Dans la figure suivante, on regroupe les résultats obtenus pour différentes expériences réalisées.

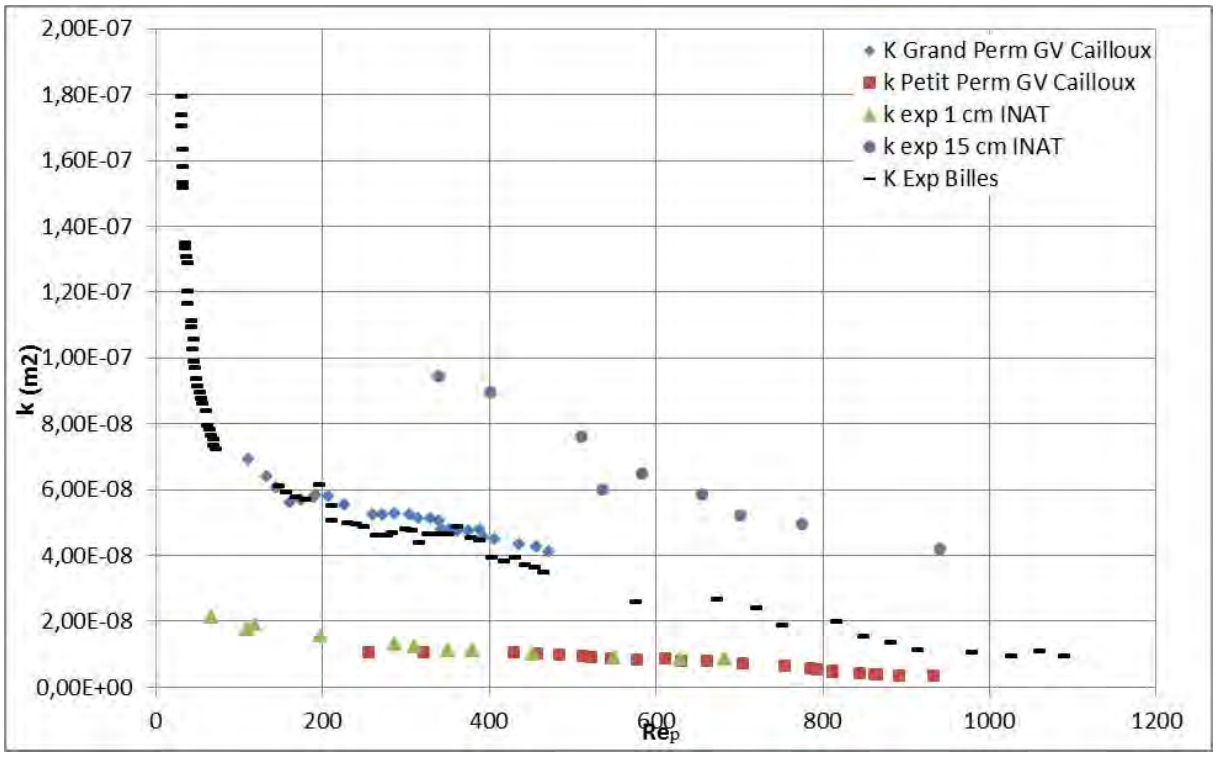


Figure I.3.21 : Résultats des différentes expériences réalisées dans les perméamètres de l'INAT et de l'IMFT

La première remarque que l'on peut extraire à partir de ces graphes, c'est que l'on a obtenu des résultats très proches avec les perméamètres de l'INAT et de l'IMFT pour les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=1 cm. Le nombre de Reynolds maximal atteint est de l'ordre de 1100 pour les billes alors qu'il est de l'ordre de 950 pour les deux types de cailloux.

I.3.3.3 Conclusion sur les deux expériences dans les deux perméamètres

Les deux expériences permettent d'étudier l'effet de la rugosité. En comparant les résultats des billes et des cailloux ayant un diamètre moyen de particules d=1cm, on remarque que la perméabilité diminue avec l'augmentation de la rugosité. A partir de ces résultats, on va maintenant déterminer les coefficients de chaque relation étudiée.

I.4 Chapitre 4

Simulation et Modélisation

I.4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter nos résultats de simulations réalisées sur les expériences dans les deux perméamètres (celui de l'INAT et celui de l'IMFT) et sur le grand canal de l'INAT.

Les simulations des expériences réalisées dans les perméamètres permettent de tracer la courbe de variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds ainsi que de déterminer les différents paramètres de chaque relation testée.

Les simulations dans le grand canal consistent à reproduire la ligne d'eau avec les différentes relations testées.

Au cours de cette étude, dans un premier temps, on a déterminé la perméabilité de Darcy, sans passer par des expériences dans un perméamètre, puis on a déterminé les paramètres des deux relations de Forchheimer (1901) et de Barree et Conway(2004) pour des expériences réalisées avec des cailloux de diamètres moyen d= 5cm et 7 cm.

I.4.2 Calcul de la ligne d'eau

Pour l'écoulement turbulent à travers les milieux poreux grossiers, les forces inertielles ne peuvent pas être négligées. Par analogie avec l'écoulement à surface libre dans les canaux, l'équation dynamique d'écoulement graduellement varié (GVF) est suggérée par certains chercheurs afin d'étudier l'écoulement dans les milieux poreux (Asiaben et *al.* 2015).

L'équation de l'écoulement graduellement varié est donnée par la relation suivante (Bari and Hansen 2002; Asiaban et *al*. 2015) :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I - J}{1 - F_{rp}^2} \tag{28}$$

Avec x est la distance le long du milieux poreux (m), h est la hauteur d'eau (m), I est la pente du fond du canal, J est la perte de charge et Fr_p est le nombre de Froud dans les pores exprimé par la relation suivante :

$$F_{rp} = \frac{V}{n\sqrt{g\,h}} \tag{29}$$

Où V est la vitesse de Darcy (m/s), n est la porosité du milieu poreux, et g est l'accélération de gravité (m/s^2).

La simulation de la ligne d'eau est faite par la résolution de l'équation de l'écoulement graduellement varié sur MATLAB en utilisant le solveur ODE45 des équations différentielles.

I.4.3 Détermination des paramètres des relations de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) par la méthode d'optimisation et comparaison entre ces deux relations.

Avant l'installation du perméamètre de l'INAT, on a déterminé la perméabilité de Darcy pour les deux relations de Forchheimer (1901) et de Barree et Conway(2004). Pour cela, on utilise une méthode de calage manuelle explorant l'ensemble des paramètres afin de réduire l'écart entre la ligne d'eau simulée et celle obtenue expérimentalement. Par la suite, on ne différenciera pas optimisation et calage de l'ensemble des paramètres, notre objectif étant la ligne d'eau expérimentale.

Nous cherchons donc à déterminer l'ensemble des paramètres des relations de Forchheimer (1901) et de Barree et Conway(2004). Nous nous focalisons sur les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d= 5 cm et 7 cm dans le grand canal de l'INAT. Les expériences consistaient à mettre un milieu poreux de longueur de 2.5 m au centre du canal et de faire varier le débit de l'écoulement. Pour chaque débit, on enregistre la ligne d'eau. Pour ces deux tailles de cailloux on a réalisé des expériences avec les débits 10, 20, 30, et 45 l/s, mais on ne considère pour notre étude que les expériences réalisées avec les deux débits intermédiaires de 20 et 30 l/s afin d'éviter les effets de bord dans le cas des deux autres débits (effet du fond trop notable ou de la surface du lit de cailloux).

L'objectif de cette méthode est de mieux comprendre les interactions hydrodynamiques dans des milieux de grande porosité et en particulier, dans le cas d'un écoulement à très grand nombre de Reynolds. Elle consiste à réinterpréter nos résultats du grand canal de l'INAT élaborés préalablement en simulant la ligne d'eau par la relation de Forchheimer (1901) et celle de Barree et Conway (2004) et de déterminer le lien entre les deux.

I.4.2.1 Optimisation de la relation de Forchheimer (1901)

Le modèle de Forchheimer (1901) est parmi les premiers modèles proposés pour calculer la perte de charge lorsque les effets inertiels ne sont plus négligeables. Il exprime le gradient hydraulique comme la somme de deux termes, l'un proportionnel à la vitesse, l'autre au carré de la vitesse (eq.7)

Si le nombre de Reynolds est grand Re>>1, l'écoulement est dominé par les effets inertiels et peut même être turbulent et le coefficient de frottement devient indépendant du nombre de Reynolds, mais varie suivant la structure poreuse.

L'équation de Forchheimer (1901) a fait l'objet de nombreuses études théoriques dans le cas de milieu poreux de structure périodique pour lesquels la simulation directe des écoulements permet le calcul des paramètres de la loi de perte de charge (voir Soulaine, 2012 et les références à l'intérieur).

L'hydraulique des ouvrages en enrochement enterrés s'est appuyée sur une approche plus empirique de la formulation de la perte de charge, avec un passage obligé par des expériences d'écoulements dans des milieux en enrochements de structure très complexe.

Pour bien comprendre le phénomène il est nécessaire d'étudier l'évolution de la perméabilité du milieu en fonction du nombre de Reynolds. Les premières expériences réalisées à l'INAT manquent de données pour la détermination de la perméabilité de Darcy des milieux étudiés.

Pour cela, on a opté pour une méthode d'optimisation de la relation de Forchheimer (1901) en se basant sur les résultats expérimentaux. La méthode consiste à minimiser l'erreur entre les résultats expérimentaux et les simulations par la relation de Forchheimer (1901) pour chaque couple de k_d et . On obtiendra ainsi le couple donnant la valeur minimale d'erreur, ceci permettant de déterminer la perméabilité de Darcy des deux milieux étudiés ainsi que le coefficient de Forchheimer . La valeur de K_d va être utilisée comme donnée dans la relation de Barree et Conway (2004) et on cherchera par la même méthode le couple optimal de k_{mr} et T.

I.4.2.1.1Présentation des résultats

Dans un premier lieu, on a simulé les lignes d'eau par la résolution de l'équation différentielle de l'écoulement graduellement varié en utilisant Matlab. La relation de Forchheimer (1901)

utilisée est celle présentée dans l'équation 7. On a remarqué que la valeur de la perméabilité de Darcy n'a pas d'influence sur le résultat. Ceci est aisément explicable par la prédominance du deuxième terme en V^2 puisque pour toutes nos expériences, la valeur du nombre de Reynolds $Re>10^4$.

Ces premières simulations nous ont permis d'obtenir seulement les valeurs des constantes de Forchheimer qui sont :

- pour les cailloux de diamètre moyen d=5 cm, $_1$=540 $_2$=325 respectivement pour les débits 20 et 30 l/set,
- pour les cailloux de diamètre moyen d=7 cm, 3=288 et 4=282 respectivement pour les débits 20 et 30 l/s.

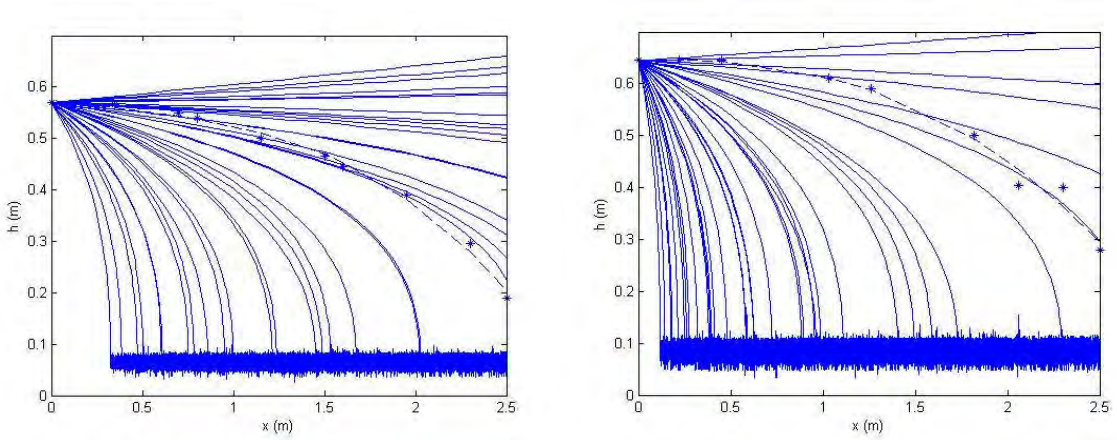
Dans un second temps, on a utilisé la relation de Forchheimer (1901) (voir Eq.7) pour calculer la perte de charge pour le reste de nos modélisations :

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{K_d}\left|\vec{V}\right| + \frac{\rho F|V|}{\sqrt{k_d}}\left|\vec{V}\right| \qquad (30)$$

Où est exprimée par la relation suivante :

$$\beta = \frac{F}{\sqrt{k_d}} \qquad (31)$$

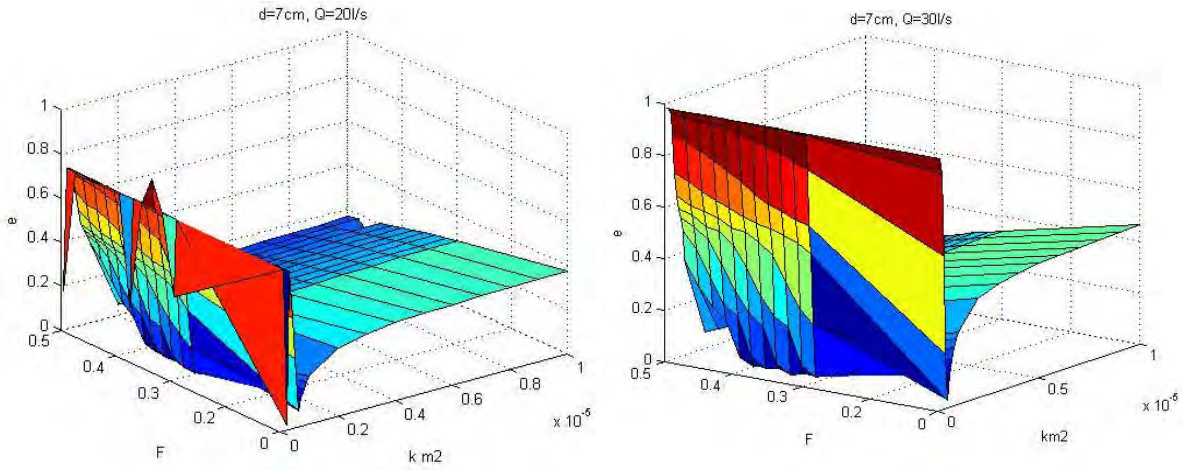
Les résultats de simulation de la ligne d'eau pour les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d = 7 cm, en faisant varier les deux paramètres K_d et F sont présentés sur la figure suivante.



(a) (b)

Figure I.4.1 : Résultats des simulations des lignes d'eau pour chaque couple de paramètre k_d et F pour les deux débits a) 20 l/s et b) 30 l/s pour l'expérience avec les cailloux de diamètre moyen d=7cm

La figure ci-dessus présente les différentes lignes d'eau obtenues pour différents couples de paramètres K_d et F pour les deux expériences réalisées avec les deux débits d'écoulement 20 l/s et 30 l/s. On peut remarquer qu'avec le débit Q=20 l/s on a obtenu des lignes d'eau plus proches de la ligne expérimentale. On a réinterprété ces résultats par des graphes 3D de l'erreur, calculée pour chaque couple en calculant l'écart à la ligne d'eau expérimentale. On a alors obtenu les graphes suivants.



(a) (b)

Figure I.4.2 : Surface de l'erreur en fonction du couple k_d et F du modèle de Forchheimer (1901) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=7cm

La figure ci-dessus montre que pour les deux débits utilisés dans le cas de l'expérience réalisée avec les cailloux de 7cm, l'erreur minimale est e=0.003 et e= 0.0015 pour les deux débits Q=20 et 30 l/s successivement. Ces valeurs sont obtenues avec le couple des variables $k_d=10^{-6}$ m^2 et F=0.32 pour les deux débits.

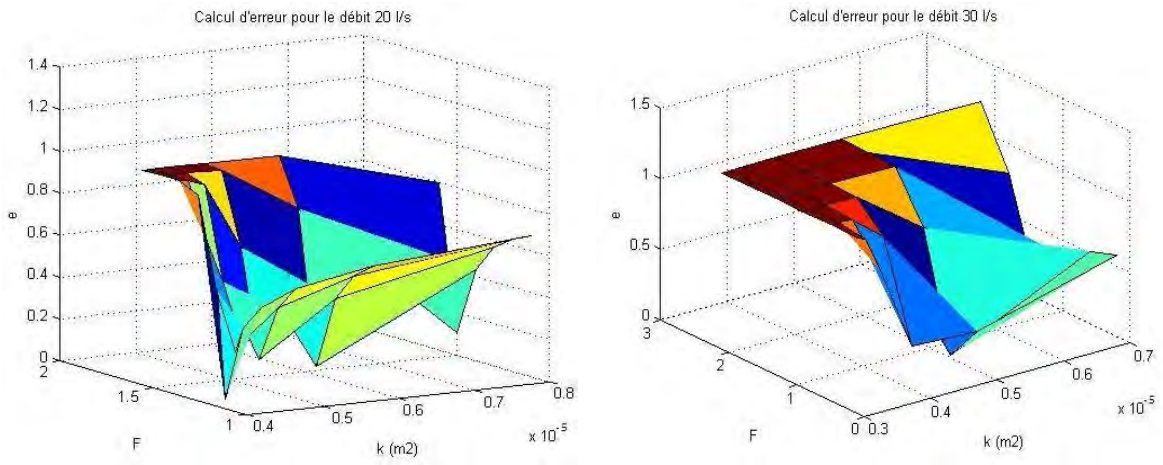


Figure I.4.3 : surface de l'erreur en fonction du couple k_d et F du modèle de Forchheimer(1901) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=5cm.

La figure I.4.3 montre que pour les deux débits utilisés dans le cas de l'expérience réalisée avec les cailloux de 5cm, l'erreur minimale est obtenue avec le couple des variables $k_d=4.1x10^{-6}$ m² et F=1.2 pour le premier débit, alors qu'avec un débit de 30 l/s les résultats donnent, $K_d= 5\ x10^{-6}$ m² et F=0.72.

Par la suite, on va utiliser les valeurs de la perméabilité de Darcy K_d dans les simulations de la ligne d'eau effectuées en prenant le modèle de Barree et Conway (2004). Puis, nous déterminerons les paramètres optimaux de cette dernière.

I.4.2.1.2. Discussion

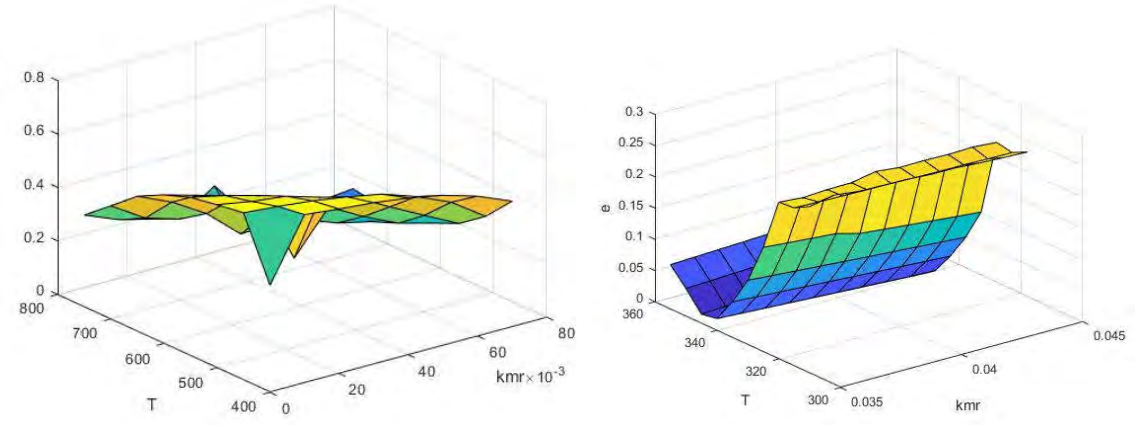
Pour les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=5cm, on a remarqué que la valeur de la perméabilité n'est pas la même pour les deux débits ce qui peut être interpréter par le fait qu'il ne s'agit pas de la perméabilité de Darcy dans la relation de Forchheimer (1901). Par contre pour les cailloux ayant un diamètre moyen d=7cm, on a remarqué que la valeur de la perméabilité est la même et qu'il n y a pas de variation entre les valeurs des constantes de Forchheimer F obtenues pour les deux débits.

I.4.2.2 Détermination des paramètres de Barree et Conway (2004)

Baree et Conway (2004) ont proposé une nouvelle équation plus générale, en introduisant l'expression de la perméabilité apparente K_{app} dans l'équation de perte de pression. Par la suite, on va déterminer les deux paramètres K_{mr} et T par la méthode d'optimisation en utilisant les perméabilités de Darcy déterminées pour la relation de Forchheimer (1901).

Pour rappel, on a obtenu pour les cailloux de diamètre moyen d=7cm, une valeur de $k_d=10^{-6}$ m² alors que pour les cailloux de diamètre moyen d=5cm, $k_d=4.5.10^{-6}$m².

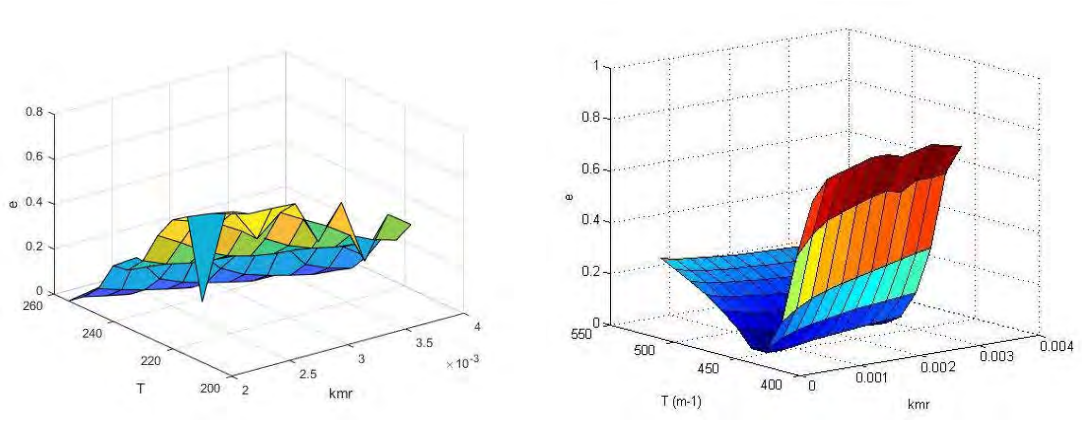
Ayant la perméabilité de Darcy, on va chercher le couple optimal de k_{mr} et de T du modèle de Barree et Conway (2004) par la même méthode. La figure ci-après montre les résultats pour le milieu constitué de cailloux de diamètre moyen d=7cm.



(a) (b)

Figure I.4.4 : surface de l'erreur en fonction du couple de k_{mr} et T du modèle de Barree et Conway (2004) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=7cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s

Pour cette expérience, les valeurs obtenues pour K_{mr} et T m^{-1} à un débit Q=20l/s sont K_{mr} =0.04, T=670 m^{-1}. Avec ce couple, l'erreur minimale est de 0.0012, alors que pour le débit Q=30l/s, on obtient K_{mr}=0.04 et T=320 m^{-1}. On a donc la même valeur de K_{mr} pour les deux débits ce qui est normal vu que $k_{mr}=\frac{k_{min}}{k_d}$ avec k_{min} la valeur minimale de la perméabilité qu'on peut atteindre pour un milieu donné, elle est bien une constante. Pour un milieu constitué de cailloux de diamètre moyen d=7 cm, k_{min}= 4x10^{-8}m². Le paramètre T varie en fonction de débit et on peut remarquer que ce paramètre est inversement proportionnel au débit.



(a) (b)

Figure I.4.5 : surface de l'erreur en fonction du couple de k_{mr} et T du modèle de Barree et Conway (2004) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=5cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s

Il faut noter que pour cette expérience, on a utilisé une valeur de perméabilité de Darcy k_d=4.5x10^{-6} m², qui est la moyenne des deux valeurs de perméabilité obtenues par le modèle de Forchheimer (1901). Dans ce cas, la figure montre une meilleure réponse (minimisation de l'erreur) avec K_{mr} =0.003 pour les deux expériences et T= 240 m^{-1} et 475 m^{-1} pour les deux débits 20 et 30 l/s respectivement. La valeur de l'erreur obtenue pour le premier débit est e= 0.0015 alors que pour le deuxième débit Q= 30 l/s, elle est de e= 0.0005.

L'objectif principal de cette étape était de déterminer la perméabilité de Darcy.

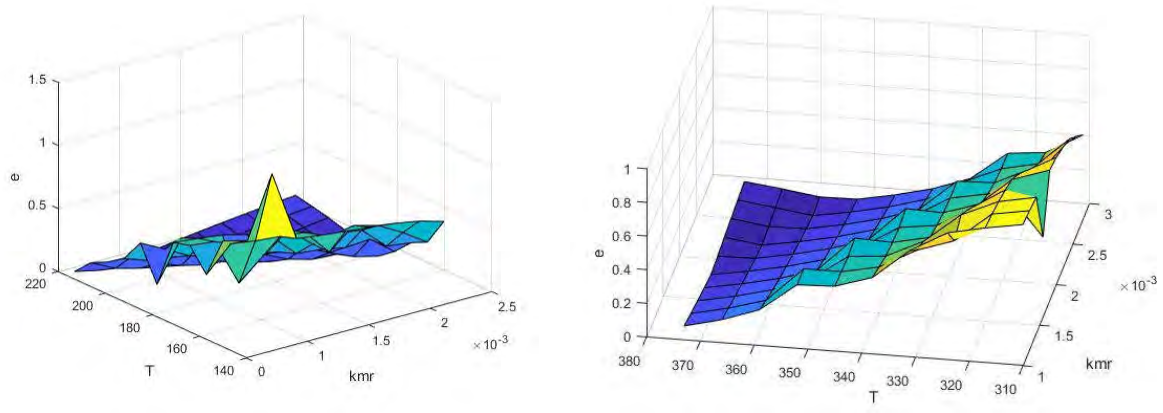
Il a été démontré dans la littérature que le modèle de Kozeny Carman (1937) est le modèle le plus approprié pour la détermination de la perméabilité de Darcy pour n'importe quel milieu poreux (Dukhan et al. 2014). En utilisant le modèle de Kozeny Carman(1937), on a obtenu une perméabilité de Darcy K_d =5.97.6x10^{-6} m² pour les cailloux de diamètre moyen d= 5cm et k_d= 1.3x10^{-5} m² pour les cailloux de diamètre moyen d=7 cm. La différence entre ces valeurs et celles obtenues par la méthode d'optimisation de l'équation de Forchheimer (1901) confirme l'hypothèse de la non utilisation de la perméabilité de Darcy dans le modèle de Forchheimer (Dukhan et al. 2014).

1.4.2.3 Optimisation de la relation de Forchheimer (1901) en utilisant la perméabilité de Kozeny Carman (1937)

Dans ce qui suit, on a recalculé les lignes d'eau pour les deux expériences par la relation de Forchheimer (1901) en considérant la perméabilité de Darcy K_d déterminée par la relation de

Kozeny Carman (1937) comme un paramètre donné. On a ensuite tracé la variation de l'erreur en fonction du paramètre de Forchheimer F. On a alors obtenu les résultats suivants.

Pour les cailloux de diamètre moyen d=5cm, le coefficient de Forchheimer vaut F=1.31 pour Q=20 l/s, et F= 0.78 pour Q=30 l/s. Pour les cailloux de diamètre moyen d=7m, on a obtenu F=1.03 avec le débit Q=20 l/s et F= 0.99 avec le débit Q=30 l/s. On a utilisé les valeurs de la perméabilité de Kozeny et Carman (1937) pour recalculer les coefficients de la relation de Barree et Conway (2004), et on a obtenu les figures suivantes.



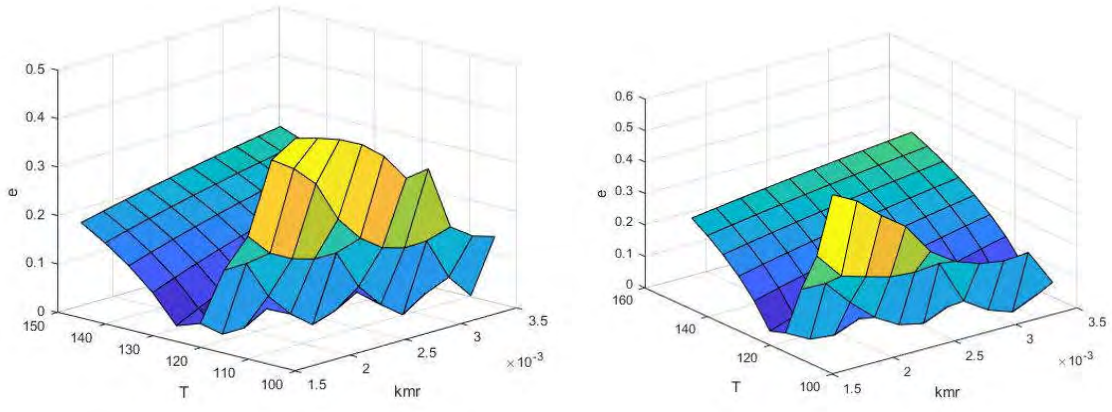
(a) (b)

Figure I.4.6 : Surface de l'erreur en fonction du couple de kmr et T du modèle de Barree et Conway (2004) en utilisant la perméabilté de Kozeny Carman (1937) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=5cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s

Pour les deux expériences, on obtient k_{mr}= 0.0022 alors que, T=187 m^{-1}, et T= 368 m^{-1} pour les deux débits Q=20 l/s, et Q= 30 l/s, respectivement. D'après ces résultats, on remarque que la valeur de k_{mr} est différente par rapport à la valeur trouvée précedemment en imposant la valeur provenant de la relation de Forchheimer (1901). Cette différence est attribuée à la différence entre la valeur de K_d calculée par la relation de Kozeny Carman (1937) et celle obtenue par la méthode d'optimisation.

Dans ce cas des expériences, on a K_{min}=1.32x10^{-8}m².

On présente ci-après les résultats pour les expériences réalisées avec las cailloux de diamètre moyen d= 7 cm.



(a) (b)

Figure I.4.7 : Surface de l'erreur en fonction du couple de kmr et T du modèle de Barree et Conway (2004) en utilisant la perméabilté de Kozeny Carman (1937) pour l'expérience avec des cailloux de diamètre moyen d=7cm ; (a)= 20l/s et (b)= 30 l/s.

Pour ces expériences, on a obtenu une valeur de K_{mr}= 0.002 pour les deux débits avec des valeurs de T qui sont proches. On a obtenu T= 130 m^{-1} et T=120 m^{-1} pour respectivement les débits de Q=20 puis 30 l/s. Sachant que la perméabilité de Darcy K_d= 1.3 x10^{-5} m², la valeur de K_{min} pour ce milieu est K_{min}=2.6 x10^{-8} m².

D'après ces simulations, la perméabilité utilisée pour calculer le terme inertiel en V^2 de la relation de Forchheimer (1901) n'est pas celle de Darcy ce qui peut expliquer la différence entre les résultats du coefficient de Forchheimer obtenus par la méthode d'optimisation et ceux obtenus en utilisant la perméabilité de Kozeny Carman (1937).

Dukhan et al. (2014) ont proposé une relation entre la perméabilité de Darcy et celle de Forchheimer (1901) de la forme suivante : $k = \frac{k_d}{A}$

Où le coefficient A est déterminé expérimentalement et dépend du régime d'écoulement. A l'aide de nos expériences, ce coefficient peut être déterminé à partir de la perméabilité obtenue par la méthode d'optimisation de la relation de Forchheimer (1901). Le tableau suivant présente les perméabilités obtenues, et la valeur de la constante de Dukhan (Dukhan et *al.* (2014)).

Tableau I.4.1: Perméabilité de Darcy, perméabilité de Forchheimer (1901) et coefficient de Dukhan A Dukhan et *al.* (2014)

d (cm)	5		7
Débit Q (l/s)	20	30	20/30
k_{Forch} (m^2)	$4.25\ 10^{-6}$	$4.85\ 10^{-6}$	10^{-6}
k_d (m^2)	$6\ 10^{-6}$	$6\ 10^{-6}$	$1.3\ 10^{-5}$
A	1.41	1.23	13

Le tableau ci-après regroupe les résultats des simulations et les différents paramètres obtenus en utilisant la perméabilité de Darcy et celle obtenue par optimisation de la relation de Forchheimer (1901).

Tableau I.4.2 : Paramètres de simulation obtenus en utilisant la perméabilté déterminée par la méthode d'optimisation

5(cm), $k_d = 4{,}5.10^{-6}$ m^2						7(cm), $k_d = 10^{-6}$ m^2					
20 l/s			30 l/s			20			30		
Barree		forch	Barree		Forch	Barree		Forch	Barree		Forch
K_{mr}	T m^{-1}	F	K_{mr}	T m^{-1}	F	k_{mr}	T m^{-1}	F	k_{mr}	T m^{-1}	F
0.003	240	1.2	0.003	475	0.72	0.04	670	0.32	0.04	320	0.32

Tableau I.4.3 : Paramètres de simulation obtenus en utilisant la perméabilté de Kozeny Carman (1937)

5(cm), $k_d = 6\ .10^{-6}$ m^2						7(cm) $k_d = 1.310^{-5}$ m^2					
20 l/s			30 l/s			20			30		
Barree		forch	Barree		Forch	Barree		Forch	Barree		Forch
K_{mr}	T m^{-1}	F	K_{mr}	T m^{-1}	F	k_{mr}	T m^{-1}	F	k_{mr}	T m^{-1}	F
0.0022	187	1.31	0.0022	368	0.78	0.002	130	1.03	0.002	120	0.99

Pour chaque cas, on a tracé les lignes d'eau

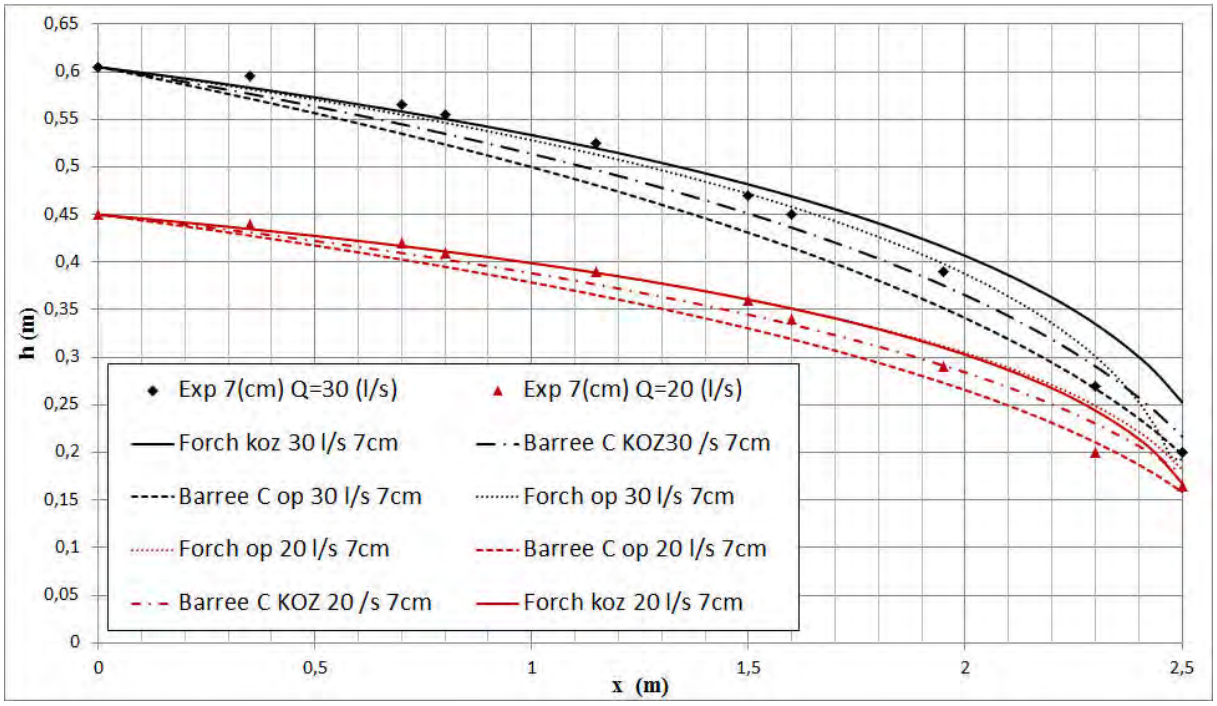


Figure I.4.8 : Simulation des lignes d'eau avec les deux relations de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) pour le milieu constitué des cailloux de diamètre moyen d=7 cm

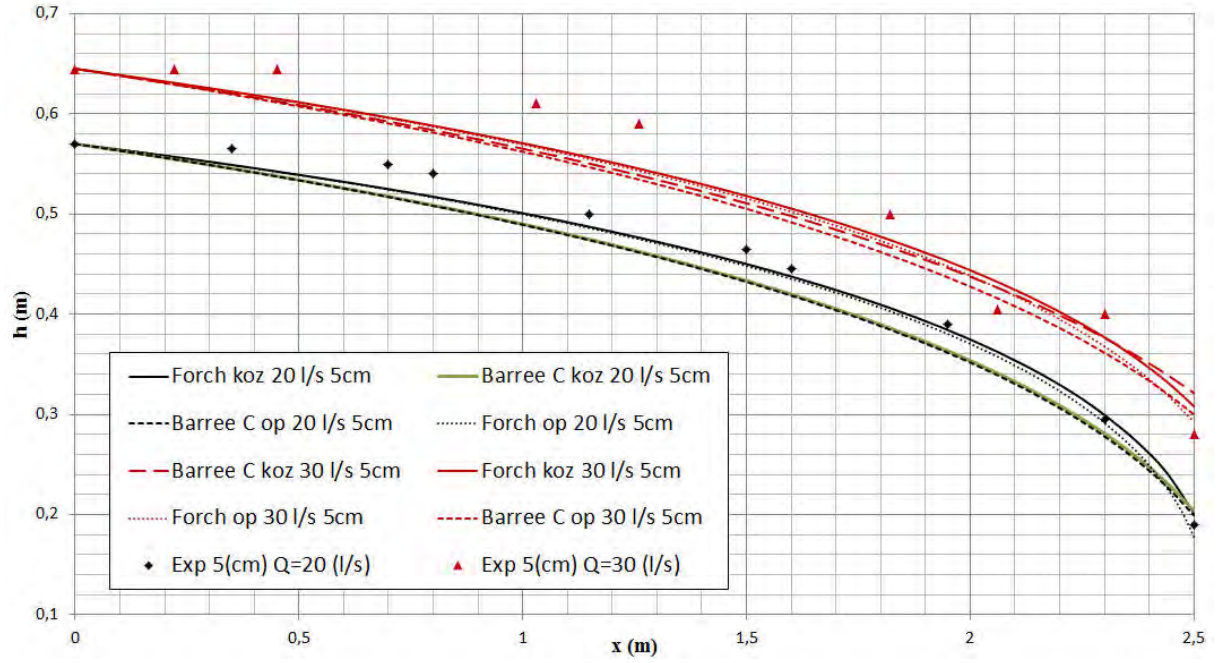


Figure I.4.9 : Simulation des lignes d'eau avec les deux relations de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) pour le milieu constitué des cailloux de diamètre moyen d=5 cm

Dans les figures I.4.8 et I.4.9, on représente les résultats des simulations réalisées avec les valeurs des perméabilités obtenues par la méthode d'optimisation et par la relation de Kozeny Carman(1937). Selon ces graphes, on peut remarquer que pour la relation de Forchheimer (1901), les résultats les plus proches de nos expériences sont obtenus en utilisant la perméabilité déterminée par la méthode d'optimisation. Pour la relation de Barree et Conway (2004), c'est l'inverse. Ceci est remarquable surtout avec les expériences réalisées avec le débit Q= 30 l/s pour les deux milieux étudiés. D'après ces résultats, on peut confirmer que la relation de Forchheimer (1901) est exprimée en fonction d'une perméabilité du milieu différente de celle de Darcy (1856) qu'on peut appeler K_{fr}. Cette perméabilité varie en fonction du régime d'écoulement, Elle peut être exprimée donc en fonction du nombre de Reynolds.

I.4.3 Simulation des expériences dans les perméamètres

I.4.3.1 Simulation des expériences dans le perméamètre de l'INAT

Dans le perméamètre de l'INAT, on a réalisé deux expériences en considérant deux milieux poreux avec des cailloux de diamètre moyen d=1cm et d=15 cm. Les détails des expériences ont été présentés dans le chapitre précédent.

Dans ce qui suit, on présente les résultats des simulations des expériences avec les relations de Forchheimer (1901), Ergun (1952) et Barrée et Conway (2004).

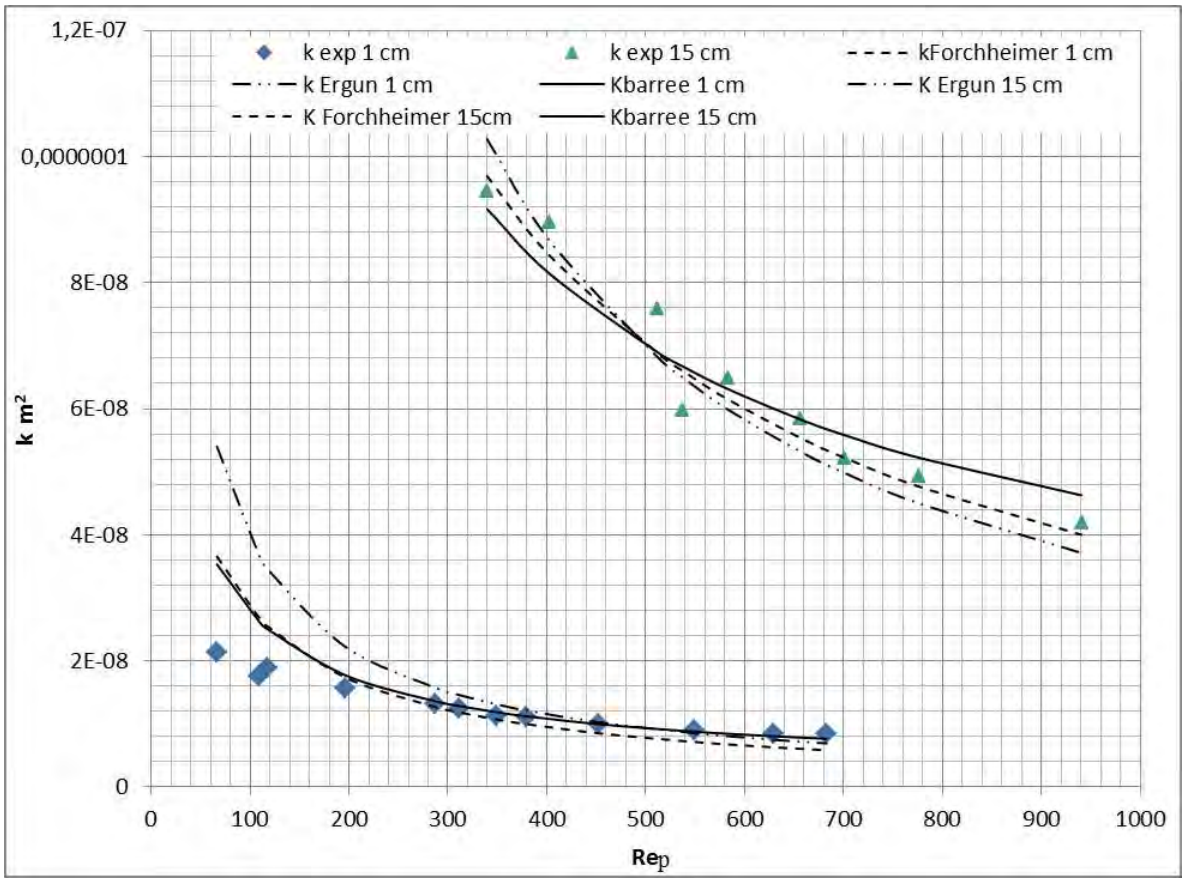


Figure I.4.10 : Simulations de la variation de la perméabilité apparente en fonction du nombre de Reynolds pour les expériences du perméamètre de l'INAT

Il faut noter que ces résultats ont été obtenus en calculant la perméabilité de Darcy dans les relations de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) obtenue par la méthode d'optimisation.

Le tableau I.4.4 regroupe les paramètres des simulations réalisées. On remarque que la perméabilité des cailloux de 15 cm est plus importante que celle des cailloux de diamètre moyen 1cm. Pour les expériences avec les petits cailloux où le nombre de Reynolds dans les pores est compris entre $66 < Re_p < 700$, on remarque que les trois relations testées donnent des résultats corrects, avec une bonne concordance dans la partie où $Re_p > 200$ et un certain décalage dans la partie où $Re_p < 200$, mais avec une bonne reproduction de l'allure de la courbe. Dans le cas des cailloux de diamètre moyen de 15 cm où $340 < Re_p < 940$, les résultats sont satisfaisants, avec une réponse très proche des relations de Forchheimer (1901) et Ergun (1952).

Tableau I.4.4 : Les paramètres de simulation des expériences avec les deux types des cailloux

d (cm)	Ergun		Forchheimer		Barree et Conway		
	A	B	K_d (m^2)	F	K_d (m^2)	T (m^{-1})	K_{mr} (m^2)
1	150	7.5	$8{,}42.10^{-08}$	1.5	$8{,}42.10^{-08}$	2000	0.032
15	150	2.65	$4.94.10^{-07}$	0. 55	$4.94.10^{-07}$	2000	0.032

Dans un deuxième temps, on a calculé la perméabilité de Darcy par la relation de Kozeny Carman (1937). En premier temps, on a utilisé la perméabilité obtenue par optimisation pour les deux tailles des cailloux 1 et 15 cm, on a obtenu respectivement k_d =4,54.10 $^{-7}$ m^2 et k_d= $9{,}16.10^{-5}$ m^2. En traçant les courbes des simulations de la perméabilité on a obtenu les résultats suivants.

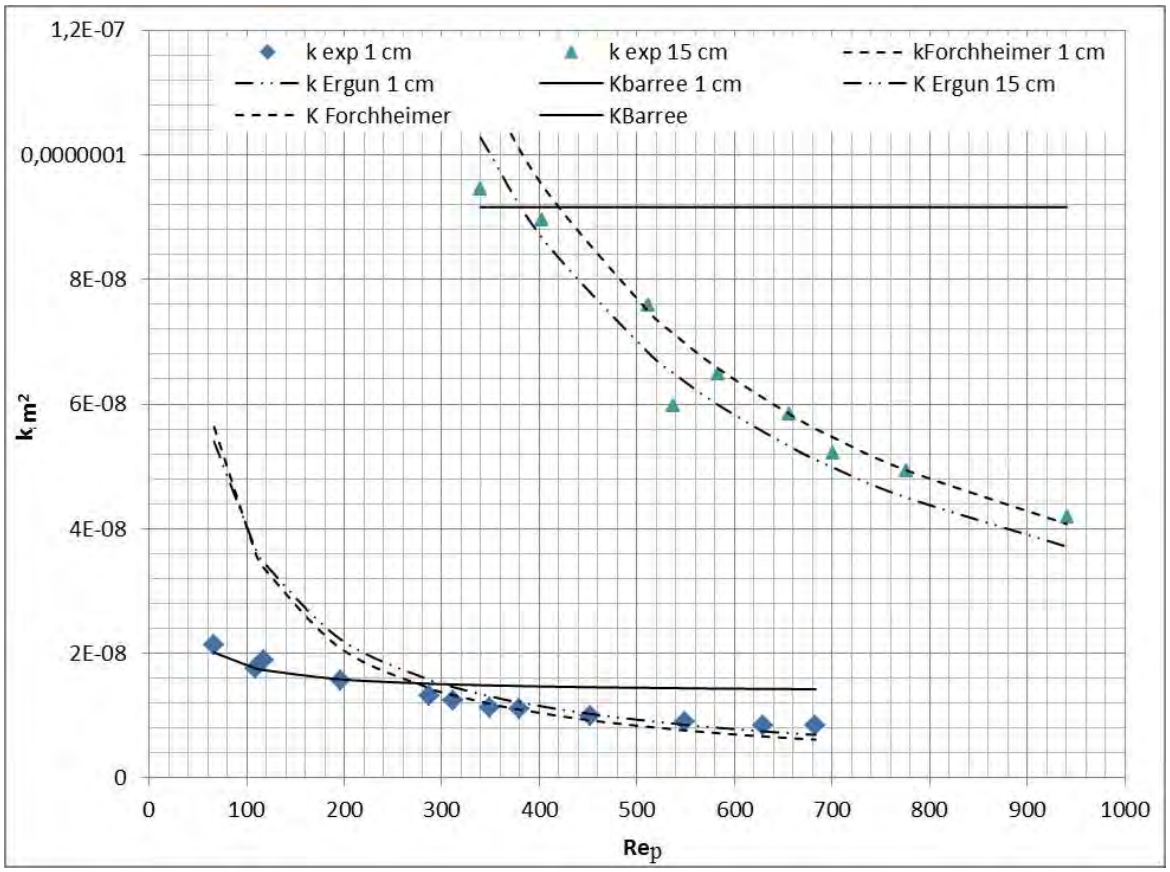


Figure I.4.11 : Simulation de la variation de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds dans les pores pour les expériences du perméamètre de l'INAT en utilisant une perméabilité de Darcy calculée par la relation de Kozeny Carman (1937).

D'après ces résultats, on peut noter que la relation de Barree et Conway (2004) n'est pas utilisable dans notre cas pour des nombres de Reynolds dans les pores $Re_p > 300$. On obtient une valeur constante, représentant la valeur de K_{min} vers laquelle tend la perméabilité pour des nombres de Reynolds dans les pores très élevés. Cependant, pour $Re_p<300$, la relation de Barree et Conway (2004) reproduit bien les expériences.

Pour la relation de Forchheimer (1901), les simulations s'ajustent bien aux expériences pour les écoulements turbulents avec $Re_p > 300$. On peut attribuer le décalage entre les résultats expérimentaux et les résultats des simulations pour les cailloux de diamètre moyen d=1 cm pour un nombre de Reynolds dans les pores $Re_p < 300$, à la variation du régime d'écoulement. En effet, les constantes caractéristiques des relations testées dépendent à la fois des caractéristiques physiques du milieu poreux ainsi que des caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement. Les résultats des simulations par la relation d'Ergun (1952) sont proches de ceux obtenus par Forchheimer (1901), surtout dans le cas des cailloux de diamètre moyen d=1cm. Le tableau ci-après regroupe les différents paramètres de simulation de chaque relation.

Tableau I.4.5 : Paramètres de simulation des expériences dans le perméamètre de l'INAT, avec les deux types des cailloux, d=1cm et d=15 cm, où la perméabilité de Darcy est déterminée par la relation de Kozeny Carman (1937)

d (cm)	**Ergun**		**Forchheimer**		**Barree et Conway**		
	A	B	K_d (m^2)	F	K_d (m^2)	T (m^{-1})	K_{mr} (m^2)
1	150	7.5	$4{,}54 .10^{-7}$	3.5	$4{,}54 .10^{-7}$	45	0.003
15	150	2.65	$9{,}16 .10^{-5}$	8	$9{,}16 .10^{-5}$	45	0.001

On a tracé la courbe de variation de $\frac{\Delta P}{L V}$ en fonction de la vitesse d'écoulement V pour les deux types des cailloux, Avec ΔP est la variation de pression (Pa), L, la longueur du milieu poreux (m) et V est la vitesse moyenne d'écoulement (m/s).

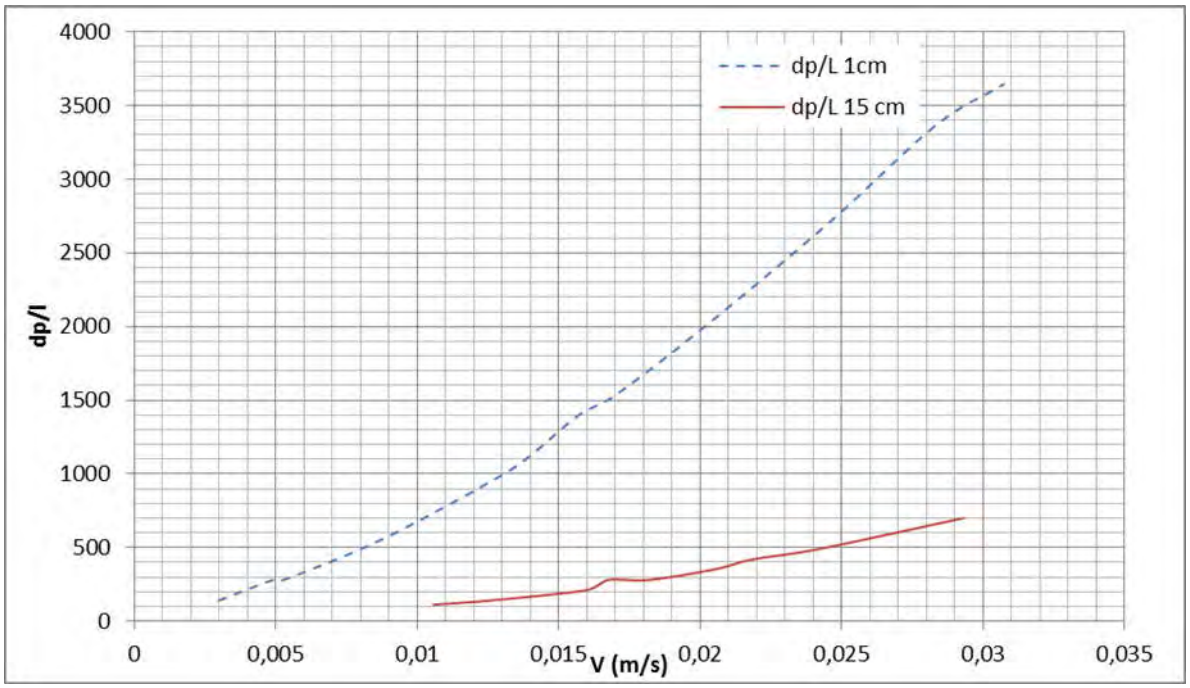


Figure I.4.12 : Régime d'écoulement des expériences réalisées dans le perméamètre de l'INAT : variation de ΔP/L en fonction de la vitesse d'écoulement

I.4.3.2 Simulation des expériences dans les perméamètres de l'IMFT

Dans les perméamètres construits à l'IMFT (décrit dans le chapitre précédent), on a réalisé des expériences avec deux types de milieux poreux, le premier est constitué de billes de verre homogènes de diamètre moyen d=1cm, alors que le deuxième est constitué de cailloux de diamètre moyen d=1cm.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats de simulations de ces expériences par les relations de Forchheimer(1901), Ergun(1952), et celle de Barree et Conway(2004).

En se basant sur les équations (7) et (9), on peut exprimer les perméabilités de Forchhheimer et Ergun par les relations suivantes :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_d} + \frac{\beta\rho}{\mu} V \tag{32}$$

$$\frac{1}{k} = \frac{A(1-n)^2}{n^3 d^2} + \frac{B(1-n)\rho}{n^3 d\mu} V \tag{33}$$

La figure ci-après présente les résultats de simulations de la perméabilité en utilisant les résultats obtenus grâce au perméamètre de l'IMFT mais aussi pour les expériences de Dukhan et *al.* (2014).

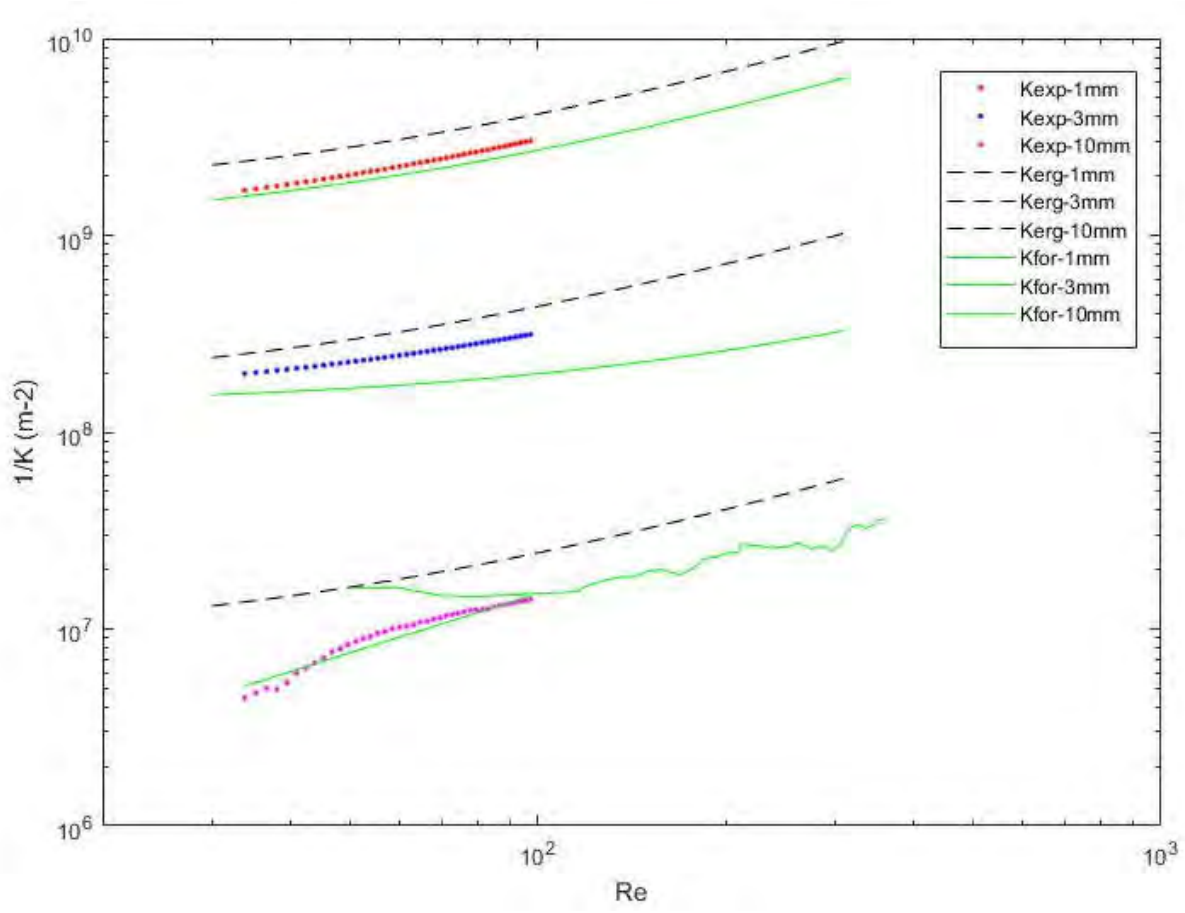


Figure I.4.13 : comparaison des résultats des expériences de Dukhan (2014) et de l'IMFT avec les différents modèles

Il s'agit d'un graphe semi logarithmique présentant la variation de l'inverse de la perméabilité en fonction du nombre de Reynolds. On peut remarquer que la perméabilité est proportionnelle à la taille de ses particules. Les billes de diamètre moyen d=10 mm forment le milieu le plus perméable avec une perméabilité de l'ordre de 10^{-7} m² alors que la perméabilité des billes ayant le diamètre moyen d=1mm est de l'ordre de 10^{-9} m² pour des nombres de Reynolds Re> $10^{1.5}$. Pour la relation d'Ergun (1952), on a utilisé les mêmes valeurs de A et B pour simuler les expériences de Dukhan et *al.* (2014) et de l'IMFT puisqu'il s'agit de particules sphériques dans les deux cas. On a donc A=150 et B=1.75.

Pour les résultats de simulation avec la relation de Forchheimer (1901), les paramètres de chaque expérience ainsi que des simulations sont regroupés dans le tableau suivant.

Tableau I.4.6 : Paramètres de simulation des expériences de Dukhan (2014) et de nos expériences avec les billes

Milieu poreux	Régime d'écoulement	n	K 10^{-9} (m^2)	F
Billes de 1mm	Darcy	0.35	0.69	0
	inertiel	0.35	1	0.54
Billes de 3mm	Darcy	0.355	6.18	0
	inertiel	0.355	7.34	0.43
	Turbulent	0.355	6.61	0.39
Billes de 10mm	inertiel	0.402	121	0.29

La simulation de l'expérience de l'IMFT par la relation d'Ergun (1952) permet d'obtenir une bonne concordance avec les résultats expérimentaux à partir de Re>50. La relation de Forchheimer (1901) permet de simuler la perméabilité du milieu poreux avec $k_d=10^{-6}$ m² et F=1.2. Pour l'expérience de Dukhan *et al.* (2014) avec des billes de 3mm et de 1mm, les deux relations permettent de simuler la perméabilité du milieu, mais dans le deuxième cas, le modèle d'Ergun (1952) semble être un meilleur estimateur de la perméabilité.

Les deux relations permettent de déterminer la perte de charge en tenant compte des forces de viscosité et les forces d'inertie. Cependant, les paramètres de chaque relation dépendent des conditions physiques et hydrodynamiques dans lesquelles sont réalisées les expériences. En se basant sur leurs résultats, les auteurs ont fixé les constantes de chaque modèle.

Dans son étude, Dukhan et al. (2014) ont montré que la perméabilité utilisée par Forchheimer (1901) pour le calcul de la perte de charge n'est pas celle de Darcy, mais une autre perméabilité exprimée en fonction de la perméabilité de Darcy par la relation suivante

$$K = \frac{k_d}{A}$$

Où A est une constante déterminée en fonction des résultats expérimentaux. Ceci a été confirmé aussi par les résultats de nos simulations.

La simulation de nos expériences réalisées avec les billes de diamètre moyen d= 1cm avec les relations de Forchheimer (1901), Ergun (1952) et Barree et Conway (2004) nous donne les résultats suivants.

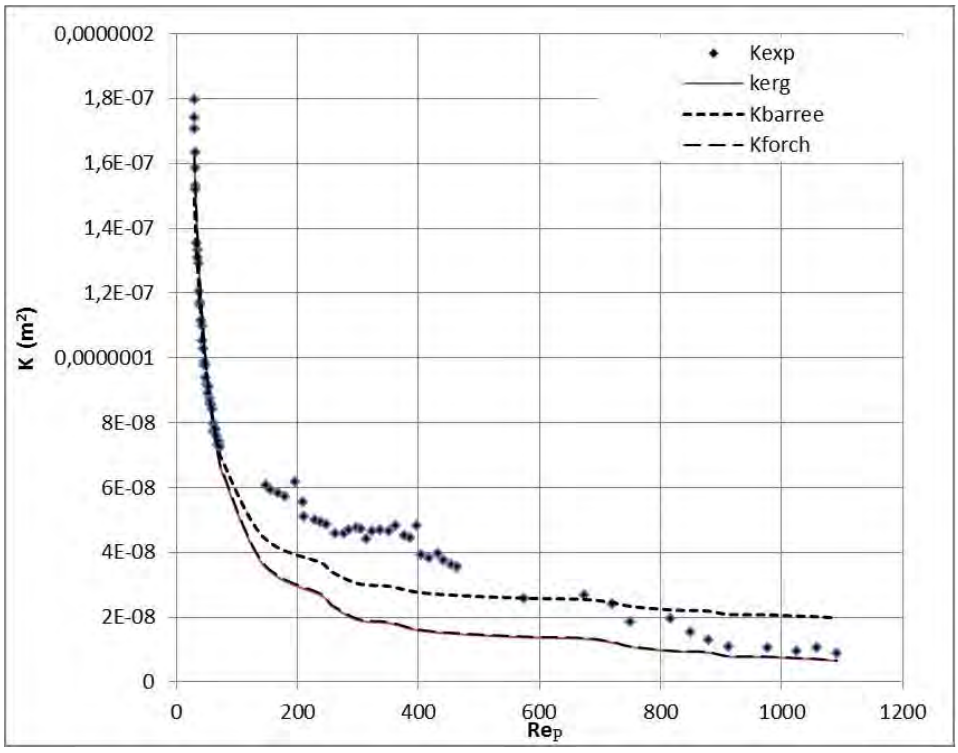


Figure I.4.14 : Comparaison entre différents modèles étudiés pour les expériences de l'IMFT

La figure ci-dessus montre que pour les nombre de Reynolds dans les pores inférieurs à 150, les trois relations testées présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Cependant, pour 150< Re_P <700, les trois relations ne donnent pas des résultats convaincants. On remarque que les deux relations d'Ergun (1952) et de Forchheimer (1901) donnent des résultats quasiment identiques. Mais, on a un écart important par rapport à celle de Barree et Conway (2004) dans cette gamme de Reynolds. Les résultats obtenus par la relation de Barree et Conway(2004) montrent que, pour des nombres de Reynolds Re_p supérieurs à 1000, la perméabilité devient constante. Cette valeur de perméabilité correspond normalement à k_{min} . Pour ce type de milieu poreux, le fait d'obtenir cette valeur à des nombres de Reynolds de l'ordre de 10^3 nous amène à dire que la relation de Barree et Conway (2004) présente aussi des limites d'application.

Ces résultats nous amène à confirmer qu'il y a bien trois régimes d'écoulement. Pour chaque régime, on doit avoir des constantes différentes. Ceci a déjà été discuté dans le chapitre bibliographique où il a été montré que pour des nombres de Reynolds compris entre $10<Re_p<300$, on est dans le régime inertiel alors que pour $Re_p>300$ on est en régime

d'écoulement turbulent. Si l'on trace la courbe de variation de $\frac{\Delta P}{V\Delta x}$ en fonction de la vitesse, cela permet de déterminer le régime d'écoulement pour un milieu poreux donné (Fand *et al.* 1987 ; Dukhan *et al.* 2014). On a donc tracé la courbe suivante pour les expériences réalisées à l'IMFT avec les billes de diamètre moyen d= 1cm.

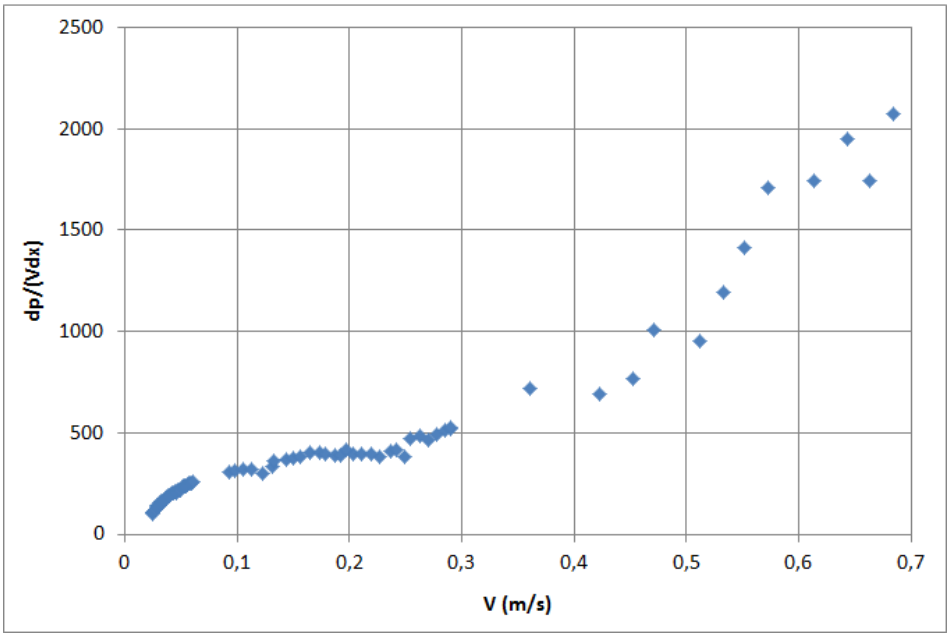


Figure I.4.15 : Perte de pression réduite par rapport à la vitesse moyenne: régime inertiel et régime turbulent

Le régime de Darcy est caractérisé par une dépendance linéaire de la perte de pression sur la vitesse, donc on obtient dans ce cas une valeur constante de la perte de charge réduite, présentée par une ligne horizontale, ce qui ne figure pas dans le graphe. Dès lors, on confirme que l'on n'a pas le régime de Darcy.

Pour notre cas, le graphe montre un seul changement de pente indiquant l'existence de deux régimes d'écoulement qui ne peuvent être autre que le régime inertiel et le régime turbulent. Ce dernier commence à environ V= 0,4 m/s, où la perte de charge réduite est considérée comme une fonction linéaire de la vitesse (Fand *et al.* 1987) ce qui nous permet de dire qu'il est semblable au régime de Forchheimer (voir Dukhan *et al.* 2014). Ces deux régimes peuvent être décrits par l'équation de Forchheimer (1901), mais avec des coefficients de perméabilité et de Forchheimer différents. Ceci explique le décalage entre les résultats de simulation et expérimentaux pour des nombres de Reynolds supérieurs à 200 dans la figure I.4.15.

En traçant la courbe de variation de la perte de charge réduite en fonction de la vitesse, cela nous permet ainsi de déterminer la limite approximative de chaque régime d'écoulement en fonction du nombre de Reynolds dans les pores. Pour les billes de verre de diamètre moyen d=1cm, on commence à avoir un écoulement Turbulent à partir de Re=638 correspondant à une vitesse V=0.4 m/s. Selon (Dybbs et Edwards 1987) il n'y a pas une unanimité sur les valeurs des points de transition entre les différents régimes d'écoulement au-delà du régime de Darcy. On a simulé chaque régime à part pour ces expériences avec les relations indiquées. On a aussi ajouté la relation de Stephenson (1979). On a obtenu les résultats suivants.

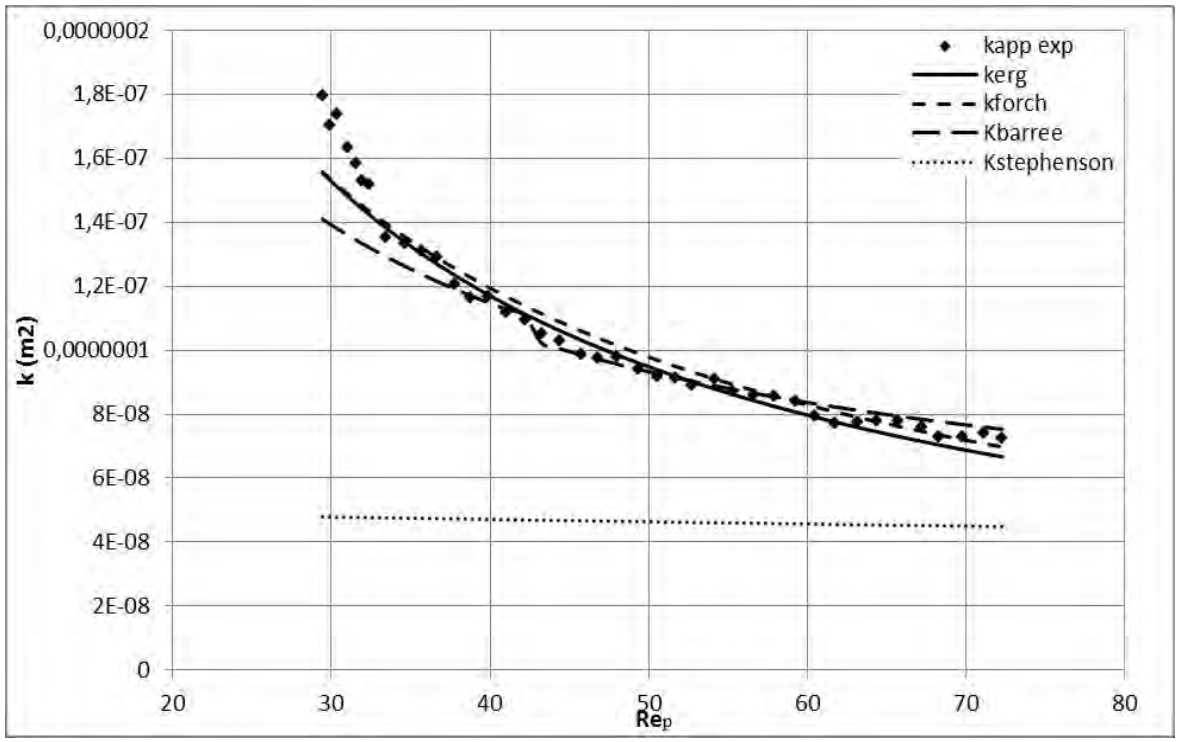


Figure I.4.16 : simulation des expériences en cas d'écoulement laminaire non linéaire

Pour un nombre de Reynolds dans les pores Re_p qui varie entre 20 et 80, dans un milieu poreux constitué de sphères de diamètre moyen d=1cm, on est en régime d'écoulement laminaire non linéaire. En effet, la relation de Stephenson (1979) ne permet pas de bien représenter cet écoulement. La courbe obtenue présente un certain décalage par rapport aux résultats expérimentaux. Ceci peut être expliqué par le fait qu'il s'agit d'une relation en V^2 qui ne permet de simuler que les écoulements turbulents. La perméabilité de Stephenson (1979) est calculée par la relation suivante :

$k = \frac{\nu d n^2}{k_{st} V}$ avec $k_{st} = \frac{800}{R_e} + k_t$ Avec, K_{st} est le coefficient de Stephenson et K_t est la constante d'angularité $1<k_t<4$, 1 pour les particules lisses et 4 pour les particules rugueuses.

On remarque aussi que les deux relations d'Ergun (1952) et de Forchheimer (1901) donnent les résultats les plus proches des expériences. Par ailleurs, elles sont presque confondues. Pour la relation de Barree et Conway (2004), on n'a pas utilisé la même valeur de paramètre T pour les nombres de Reynolds dans les pores Re_p <42 et ceux Re_p>42. Ceci est surement dû à l'estimation du nombre de Reynolds dans les pores qui est calculé en fonction de ce paramètre T dans le cas de l'étude de Barree et Conway (2004), alors que, le nombre de Reynolds dans les pores Re_p qu'on utilise pour les autres relations est calculé en fonction du diamètre des particules d et de la porosité n. Ceci induit un possible décalage entre les limites des régimes d'écoulement calculés pour chaque expression (exp : pour une vitesse V= 0.024 m/s, le nombre de $Re_{pBarree}$ = 7.98 alors que Re_p= 29.41) dans cette gamme de nombre de Reynolds. On peut alors être dans un régime de transition entre le laminaire et l'inertiel. Pour pouvoir étudier cette zone, il faudrait réaliser des expériences avec une distribution plus dense de points de vitesses.

Dans la figure suivante, on représente les résultats de simulation d'un écoulement inertiel pour les quatre relations testées.

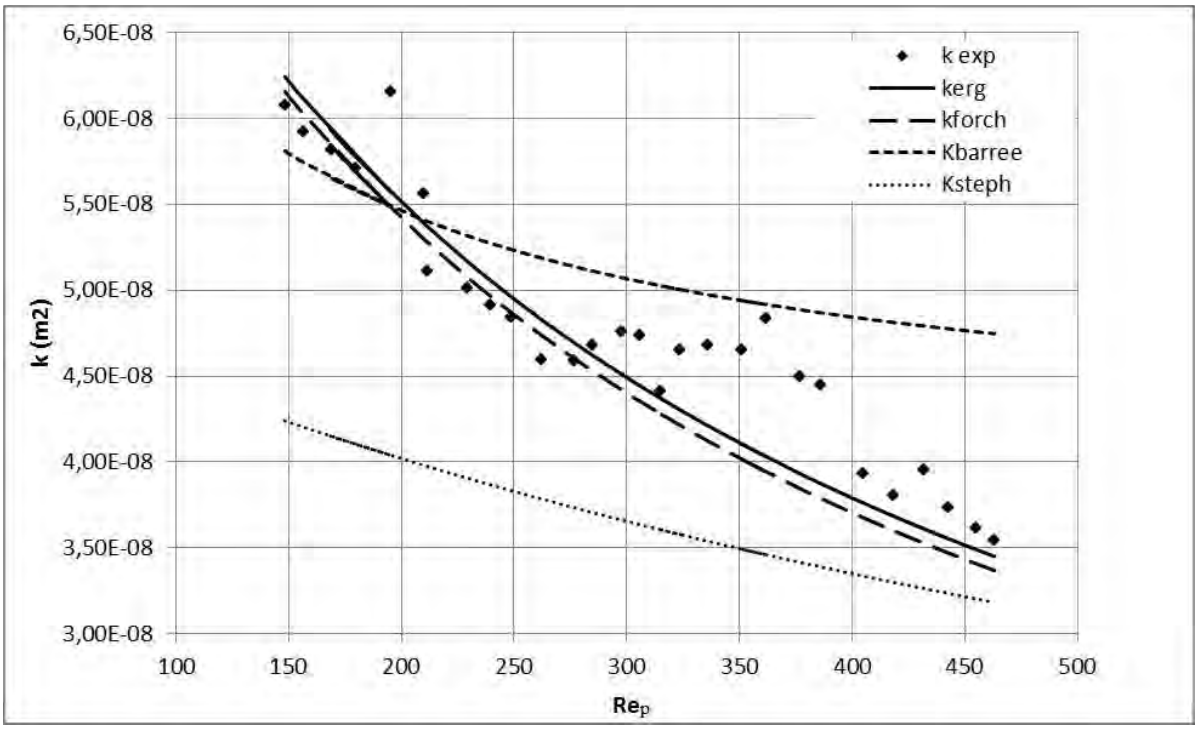


Figure I.4.17 : simulation des expériences en cas d'écoulement inertiel

Pour ces expériences, le nombre de Reynolds dans les pores Re_p varie entre 150 et 500, ce qui indique qu'on est en régime inertiel pour ce type de milieu poreux. Ceci est confirmé par les résultats obtenus en utilisant la relation de Stephenson (1979) qui est une relation qui ne permet de simuler que les écoulements turbulents.
On remarque aussi que la relation de Barree et Conway (2004) ne permet pas de simuler correctement la variation de la perméabilité dans cette gamme de régime d'écoulement, du moins avec les paramètres précédemment déterminés.

Les deux relations de Forchheimer (1901) et d'Ergun (1952) offrent des estimateurs satisfaisants pour ce type d'écoulement.

Ci-après, on regroupe les résultats de simulations avec ces quatre modèles dans le cas d'un écoulement où le nombre de Reynolds dans les pores varie entre 500 et 1100.

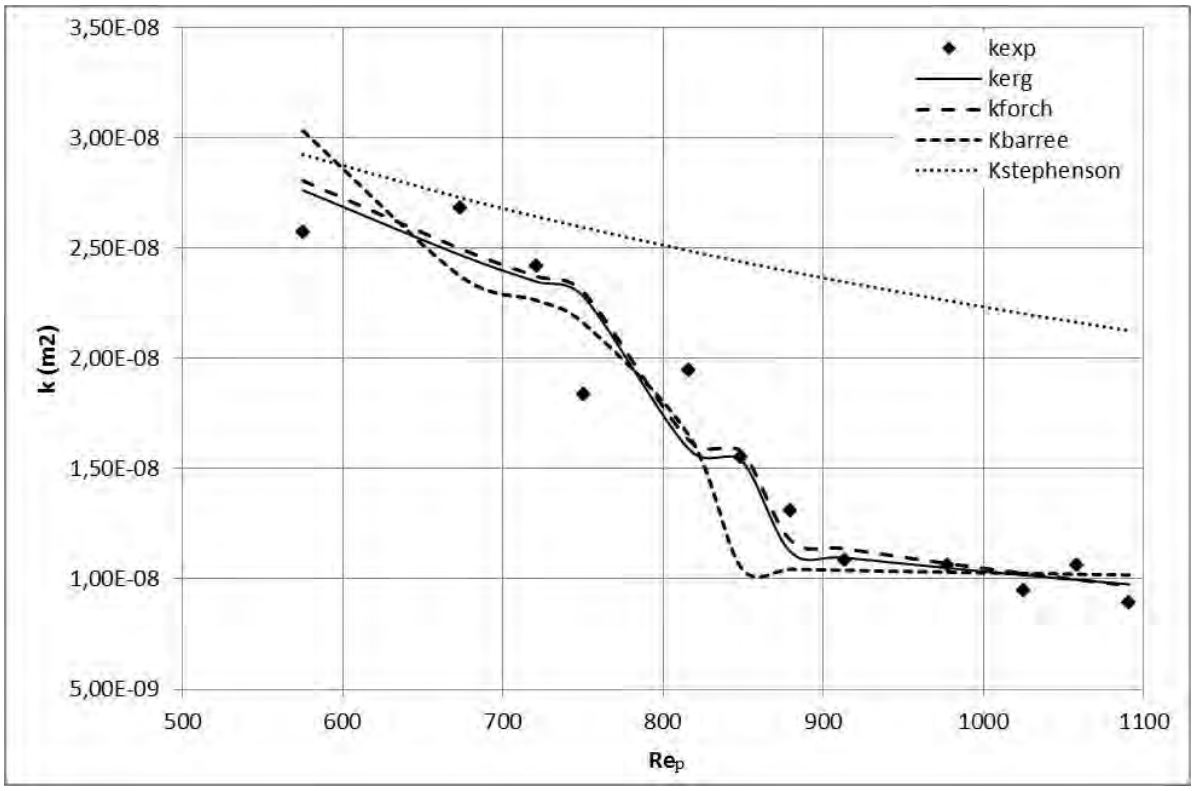


Figure I.4.18 : simulation des expériences en cas d'écoulement turbulent

Les paramètres de chaque relation sont variables selon des intervalles de nombres de Reynolds dans les pores ce qui explique l'allure de la courbe obtenue. A chaque fois qu'une cassure de la pente de la courbe est observée, il y a un changement des paramètres de simulation pour chaque relation. On n'a pas procédé ainsi avec la relation de Stephenson (1979) vu que le seul paramètre de calage est K_t. Ce paramètre est le coefficient d'angularité des particules de milieu poreux. C'est une constante qui ne dépend pas du régime d'écoulement. La variation des paramètres de simulation pour les autres relations peut être expliquée par le fait que le régime d'écoulement n'est pas stable pour les nombres de Reynolds dans les pores $500<Re_p<1100$.

Pour ces expériences, le nombre de Reynolds dans les pores varie donc entre 500 et 1100. Dans cette gamme, la relation de Stephenson (1979) surestime la perméabilité, ce qui indique qu'on se trouve peut-être dans un régime de transition entre le régime inertiel et le régime turbulent.

Pour les trois autres relations, on a séparé l'ensemble en trois régions avec des gammes de Reynolds dans les pores variant entre : $570<Re_p<750$, $750<Re_p<880$, $750<Re_p<1100$.
Dans ces trois régions, on peut déterminer les paramètres correspondants à chaque relation.
Rappelons que la perméabilité de Darcy calculée par la relation de Kozeny Carman (1937) pour ce milieu est $K_d= 1.009 \times 10^{-7} m^2$.
On a regroupé dans le tableau suivant, les coefficients de simulation des expériences réalisées pour chaque modèle en fonction de la variation du nombre de Reynolds dans les pores.

Tableau I.4.7 : Valeurs des coefficients utilisés en fonction de la gamme de Re_p pour des expériences avec les billes dans les perméamètres de l'IMFT

Re / Modèle	Passage Transitoire		Laminaire instable	Ecoulement perturbé		
	$30<Re_p<75$		$140<Re_p<470$	$570<Re_p<750$	$750<Re_p<880$	$750<Re_p<1100$
Forchheimer :	3400		1050	1500	1950	2500
Ergun : A / B	10	4	180 / 1.1	200 / 1.17	200 / 1.7	600 / 1.7
Stephenson k_t	1		1	1	1	1
Barree et Conway : kmr/T (m^{-1})	$30<Re_p<43$	$43<Re_p<75$	0.4 / 2500	0.09 / 6000	0.09 / 3000	0.09 / 750
	0.032 /200	0.032 /180				

Revenons maintenant aux expériences réalisées sur les cailloux de diamètre moyen 1cm à l'IMFT. Cette expérience est similaire à celle réalisée avec les billes de verre. La perméabilité de Darcy utilisée dans les simulations pour ce milieu est $K_d=1.33 \times 10^{-7} m^2$. Elle provient de la relation de Kozeny Carman(1937). On a obtenu pour ce milieu la courbe suivante :

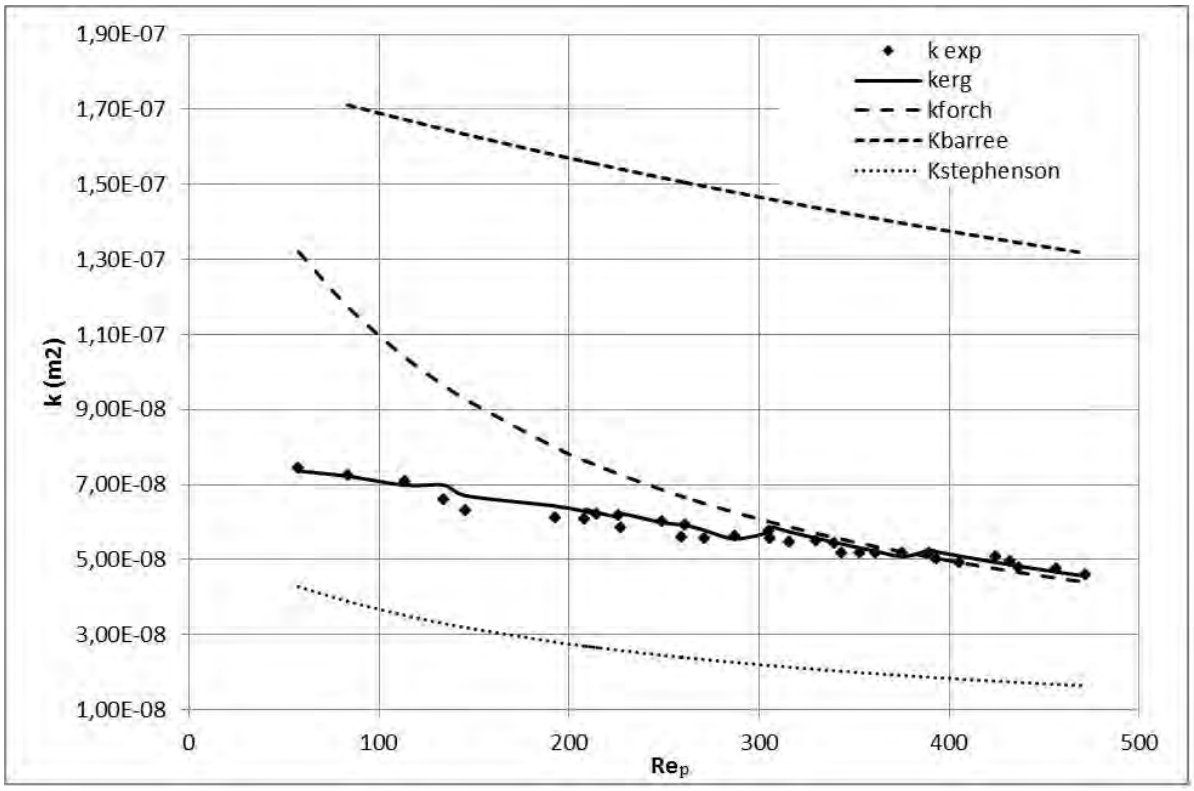


Figure I.4.19 : simulation des expériences avec les cailloux d= 1cm dans le grand perméamètre

Pour ces expériences, le nombre de Reynolds dans les pores varie entre 50 et 500, les deux relations de Stephenson (1979) et de Barree et Conway (2004) ont donné des résultats peu en accord avec les expériences. Pour la relation de Stephenson (1979), le paramètre d'ajustement est la constante d'angularité k_t. Dans ce cas, il doit être supérieur à 1 et inférieur à 4 (Jouini, 2012). Dans notre cas, on a obtenu $k_t>4$. La relation de Stephenson ne permet donc pas de simuler ces expériences ce qui doit être la conséquence d'un écoulement non pleinement turbulent. La figure I.4.19 montre que la relation de Forchheimer (1901) permet de simuler l'écoulement dans ce type de milieu poreux pour $Re_p>300$. La relation d'Ergun (1952) donne les meilleurs résultats pour toutes les expériences sachant qu'on a fait varier les constantes A et B par intervalle de nombre de Reynolds dans les pores (voit Tableau I.4.8).
Par la suite, on a travaillé sur les résultats obtenus grâce au petit perméamètre de l'IMFT dans lequel le nombre de Reynolds a atteint 970.

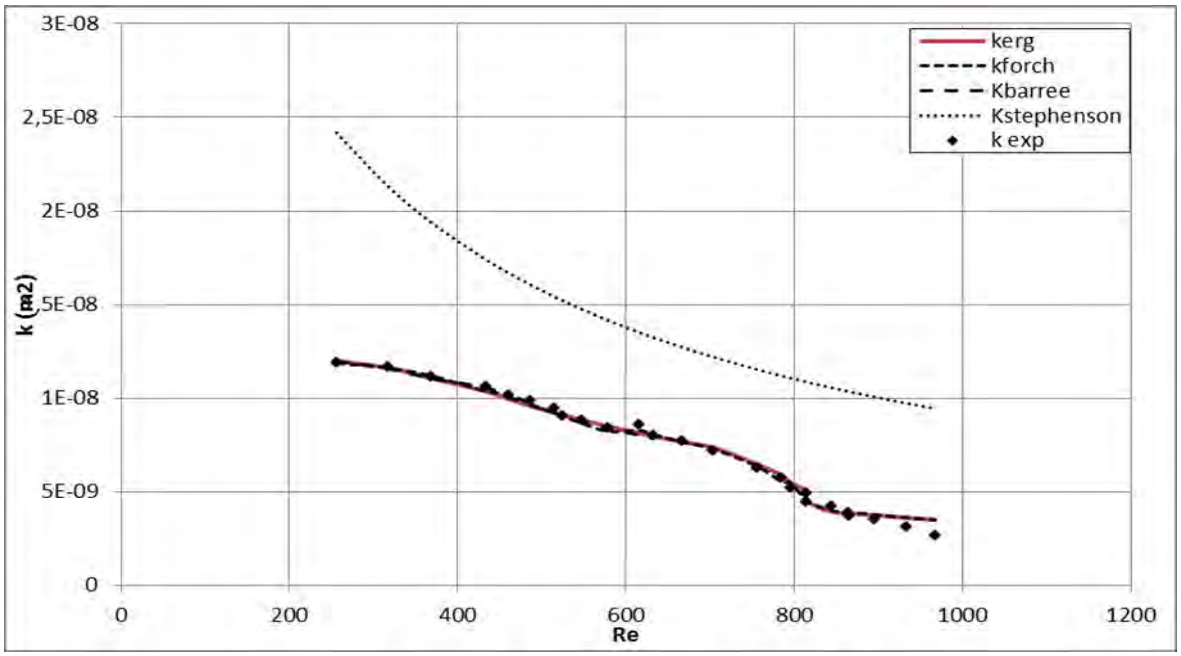


Figure I.4.20 : simulation des expériences avec les cailloux d= 1cm dans le petit perméamètre

Cette figure I.4.20 présente les résultats obtenus pour les expériences réalisées dans le petit perméamètre de l'IMFT. Pour cette gamme de nombres de Reynolds, la relation de Stephenson(1979) sous-estime la perte de charge. La perméabilité est donc plus grande que celle obtenue par les autres relations. Les trois autres relations donnent des résultats identiques mais on se doit de rappeler que l'on a fait varier les paramètres d'ajustement pour chaque relation. La variation de ces paramètres indique normalement le changement du régime d'écoulement. Le tableau ci-après regroupe les paramètres de simulation des expériences réalisées dans les deux perméamètres de l'IMFT.

Tableau I.4.8 : Valeurs des coefficients utilisés en fonction de la gamme de R_{ep} pour les expériences avec les cailloux dans les perméamètres de l'IMFT

Re_p / Modèle	Dans le grand perméamètre $57<Re_p<500$			Dans le petit perméamètre $250<Re_p<1000$		
Forchheimer : F	820			$250<R_e<700$	$750<R_e<800$	$800<R_e<1000$
				4500	5000	6500
Ergun : A / B	$57<R_e<150$	$150<R_e<250$	$250<R_e<700$	$250<R_e<430$	$430<R_e<780$	$780<R_e<1000$
	260/1.8	200/1.6	150/1.5	920/5	920/ 6.5	900/9
Stephenson k_t	4			4	4	4
Barree et Conway : kmr/T (m^{-1})	0.0001/ 0.1			$250<R_e<430$ 0.009 / 820		$430<R_e<1000$ 0.09 /1000

I.4.4 Simulation des expériences dans le grand canal de l'INAT

Chaque expérience réalisée dans le grand canal avec les cailloux de diamètre moyen d= 1cm a été simulée par les lois testées à savoir les relations de Forchheimer (1901), et Barrée et Conway (2004). On a alors obtenu les résultats suivants.

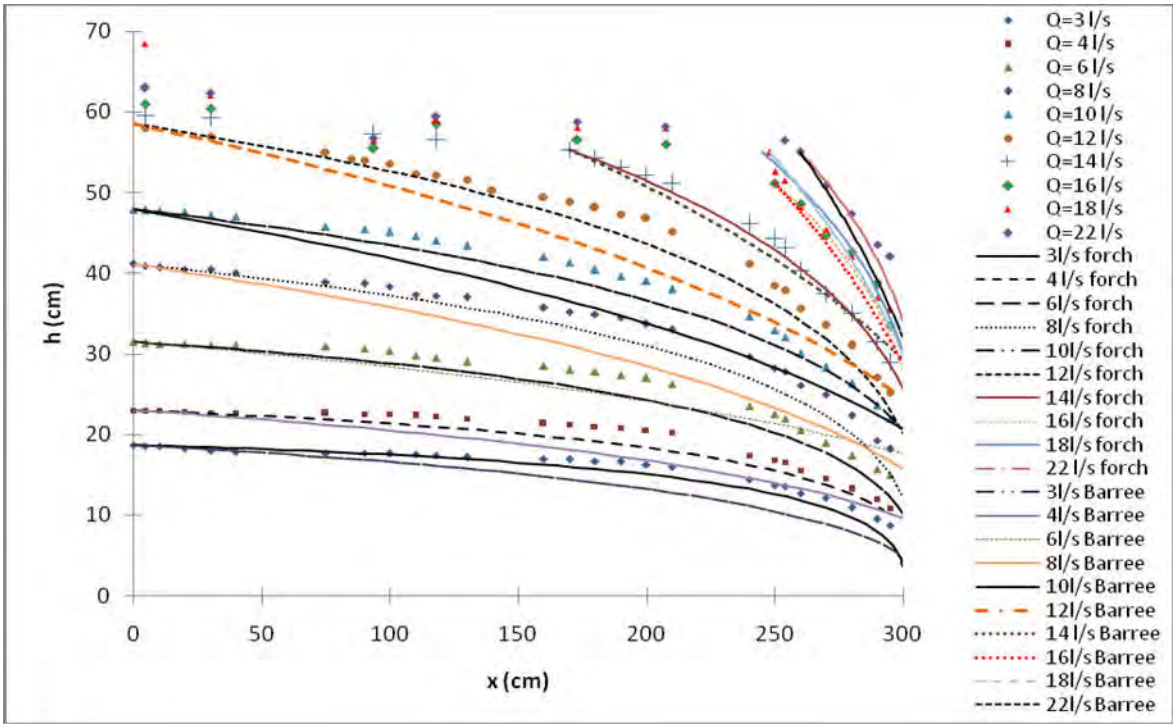


Figure I.4.21 : simulation de la ligne d'eau par la relation de Forchheimer (1901) et Barree et Conway (2004) pour une mèche de cailloux de diamètre moyen d=1cm et pour les différents débits traités

La figure I.4.21 regroupe les résultats de simulation des lignes d'eau pour les expériences réalisées dans le grand canal. On remarque qu'on a obtenu un écoulement en charge pour les débits 18 et 22 l/s. Pour les autres débits allant de 3 à 16 l/s l'écoulement est à surface libre sur toute la longueur de la mèche. Pour ces expériences, on a simulé la ligne d'eau en utilisant les relations de Forchheimer (1901) et de Barree et Conway(2004) seulement puisque notre premier objectif au début de la thèse était de comparer ces deux relations et de voir laquelle des deux qui permet d'avoir le meilleur accord avec les résultats expérimentaux. Les résultats ont montré que pour tous les débits, la relation de Forchheimer (1901) donne une bonne représentation de la ligne d'eau expérimentale sachant qu'on a utilisé la perméabilité de Darcy calculée par la relation de Kozeny Carman (1937). Pour le reste des paramètres de chaque relation, on a utilisé des valeurs différentes de celles obtenues pour les expériences réalisées dans le perméamètre de l'INAT. Ceci est expliqué par le fait que les expériences du grand

canal ont été faites pour un Reynolds dans les pores de l'ordre de 10^4. De même, on représente dans les figures I.4.22 et I.4.23, l'ensemble des résultats obtenus pour l'étude relative aux cailloux de diamètre moyen d=15 cm.

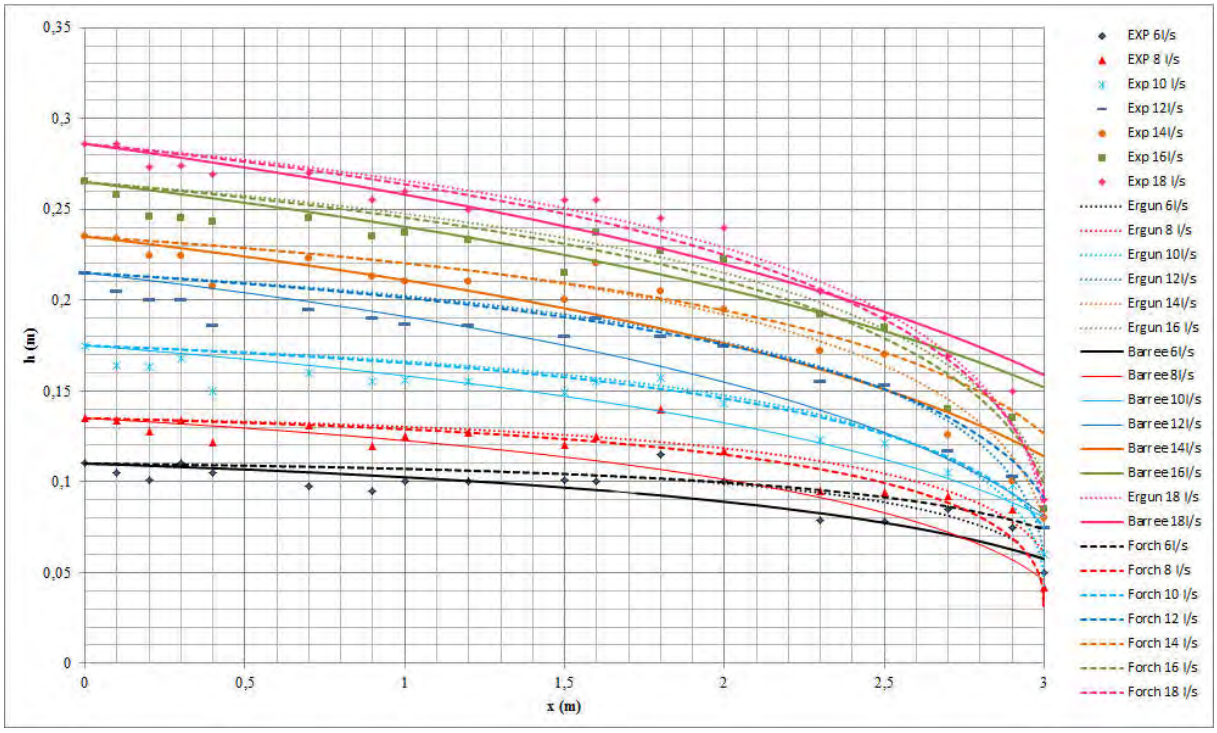


Figure I.4.22 : Simulation des lignes d'eau pour les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=15 cm pour débits de 6l/s à 18l/s

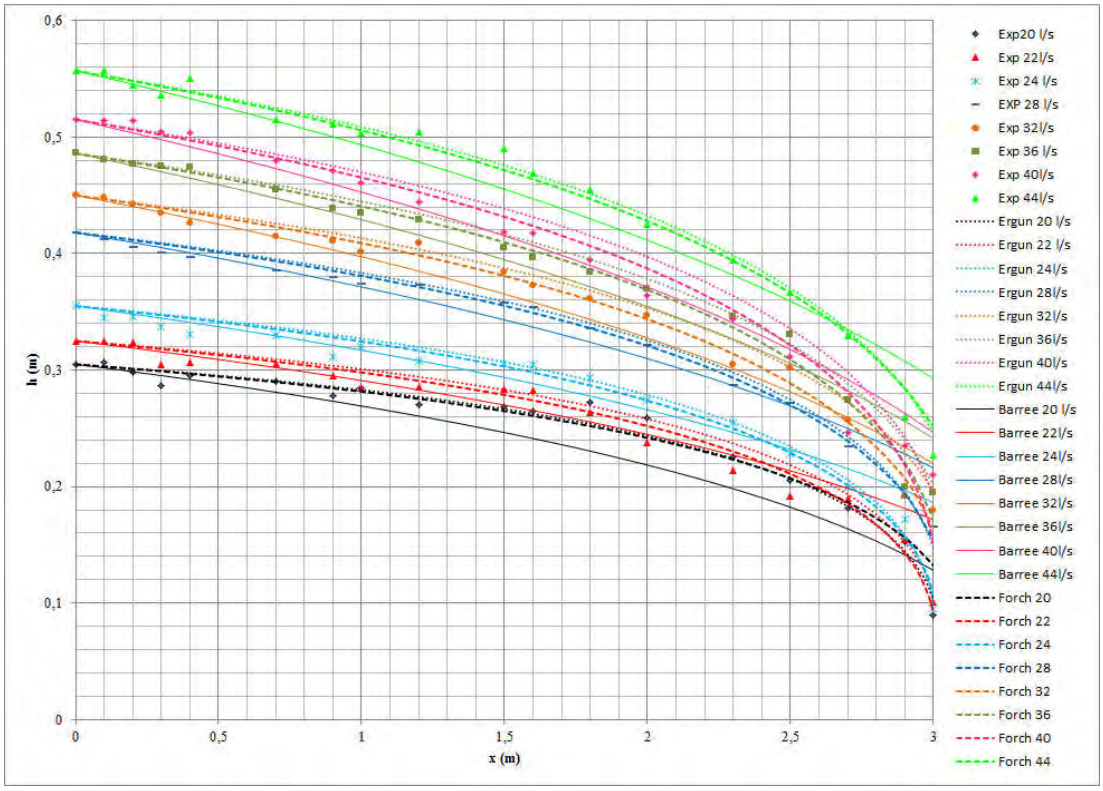


Figure I.4.23 : simulation des lignes d'eau pour les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=15 cm pour débits de 20 l/s à 44 l/s

Les deux figures I.4.22 et I.4.23 présentent les résultats des simulations des expériences avec les trois modèles de calcul de perte de charge testés. La première constatation est que pour les cailloux de diamètre moyen d= 15 cm la perte de charge n'est pas importante ce qui fait que tous les écoulements sont à surface libre même pour le plus grand débit Q= 44 l/s.

Pour ces expériences la relation de Barree et Conway (2004) donne les résultats les plus éloignés des expériences. Les relations d'Ergun (1952) et de Forchheimer (1901) donnent de meilleurs résultats avec des lignes d'eau qui sont même confondues dans la majorité des cas.

I.4.5 Calcul de la section optimale par les différentes relations

I.4.5.1 Introduction

L'un des objectifs du travail est de calculer la section minimale de la mèche permettant d'avoir toujours un écoulement à surface libre même avec le débit d'écoulement maximal pour assurer le stockage hors d'eau et la stabilité du versant de stériles minier, en plus de la détermination de la relation la plus appropriée, pouvant être utilisée. Dans ce qui suit, on présentera les résultats de calcul de la section minimale correspondante à chaque relation testée pour le milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15 cm.

La détermination de la section minimale permet à la société « le Nickel de la Nouvelle Calédonie » 'SLN' de connaitre la section minimale qui permet de conserver un écoulement à surface libre dans le milieu poreux, et par la suite de déterminer le volume des enrochements nécessaire pour la construction de ce milieu. Cela permet donc de minimiser le coût de sa mise en place.

I.4.5.2 Principe de calcul

En utilisant cette formulation de la perte de charge, nous avons appliqué la formule de Bernoulli entre deux sections (S1 et S2) de la mèche (Figure I.4.24), en considérant que la mèche est pleine sur une distance L entre la section S1 et S2, la perte de charge totale est égale à :

$$J.L = (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{p_2 - p_1}{\rho g}\right) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right) \tag{34}$$

Puisque les vitesses d'écoulements sont faibles, le paramètre cinématique de la formule de Bernoulli est négligeable devant la hauteur géométrique de l'eau. Ainsi, nous écrivons que la différence de pression entre la section S_1 et S_2 est égale à :

$$\Delta P = (j - i).L \tag{35}$$

Avec :

$P = p/\rho g$ (m) (36)

L correspond à la longueur de remplissage de la mèche :

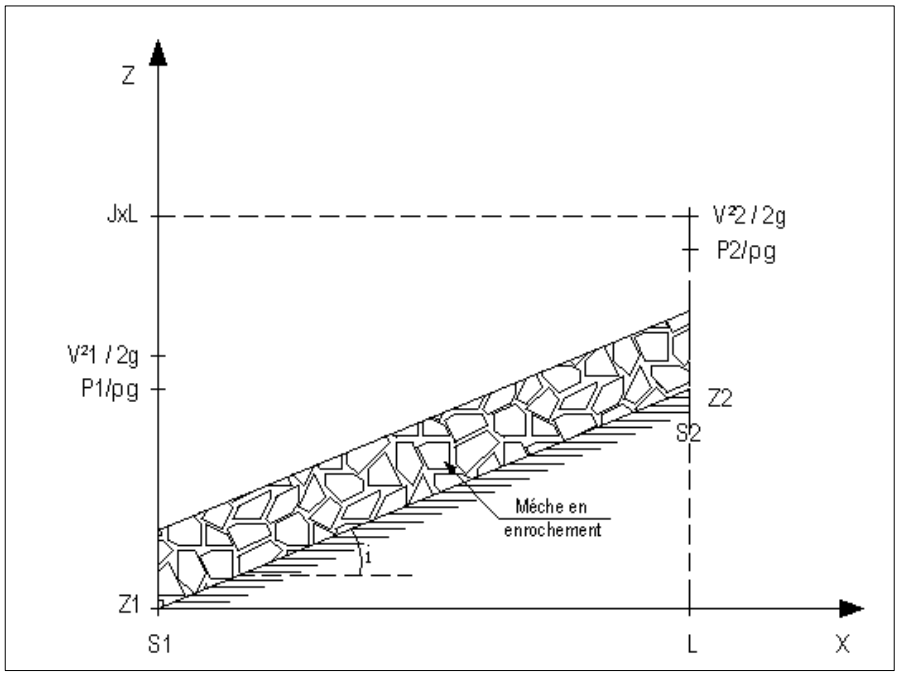


Figure I.4.24 : Application de la formule de Bernoulli entre deux sections de la mèche

Ensuite nous avons considéré que pour garantir un écoulement efficace dans la mèche, il faut avoir un gradient hydraulique inférieur à la pente de la mèche. Pour déterminer la section minimale donc, il faut que la pente du canal soit égale à la perte de charge, on a donc :

$I = j$ (37)

Par la suite, on calcul la section pour chaque relation par les équations suivantes :

- ✓ *Stephenson (1979)*

$$n^2 g\, d^2 i S^2 - 800 \nu Q n S - K_t Q^2 d = 0 \quad (38)$$

- ✓ *Forchheimer (1901)*

$$\nu Q S + \sqrt{K_d}\, F Q^2 - i g S^2 K_d = 0 \quad (39)$$

✓ *Ergun (1952)*

$$i g n^3 d^2 S^2 - AQ(1-n)^2 \nu S - d B(1-n) Q^2 = 0 \quad (40)$$

✓ *Barree et Conway (2004)*

$$K_d \mu T i S^2 + (K_d K_{mr} \rho Q i - \mu^2 Q T) S - \mu \rho Q^2 = 0 \quad (41)$$

On peut remarquer qu'il s'agit des équations quadratiques de second degré. La résolution de ces équations nous donne les valeurs de section pour chaque relation.

Le tableau ci-après regroupe les résultats de calcul.

Tableau I.4.9 : Section minimale calculée par chaque relation

Q (debit l/s)	S_Steph (m^2)	S_Barree(m^2)	S_Forchheimer(m^2)	S_Ergun(m^2)
0,02	0.222	0.401	0.296	0.271
0,03	0.333	0.602	0.444	0.407
0,05	0.556	1.003	0.740	0.678
0,1	1.111	2.005	1.481	1.356
1	11.110	20.052	14.809	13.560
2	22.221	40.103	29.618	27.121
5	55.552	100.259	74.045	67.802
10	111.104	200.517	148.090	135.603
20	222.208	401.035	296.180	271.206
25	277.759	501.293	370.225	339.008
30	333.311	601.552	444.270	406.809
40	444.415	802.069	592.360	542.412
50	555.519	1002.587	740.450	678.016

Les calculs de la section minimale ci-dessus ont été effectués pour les résultats d'expériences réalisées à l'INAT. Ces expériences se rapportent au milieu poreux constitué de cailloux de diamètre moyen d=15 cm, et pour des débits allant de 2 (l/s) à 50 (l/s).

Dans ces calculs, on a utilisé la perméabilité de Darcy pour la relation de Barree et Conway (2004), alors qu'on a utilisé la perméabilité trouvée par la méthode d'optimisation pour la relation de Forchheimer (1901).

Le tableau I.4.9 montre que la relation de Barrée et Conway (2004) surestime la valeur de la section minimale d'un rapport de l'ordre de 2 par rapport à la relation de Stephenson, alors

que les deux autres relations, celle de Forchheimer (1901) et d'Ergun (1952) donnent des valeurs proches de cette dernière.

I.4.6 Conclusion

La première conclusion qu'on peut tirer de nos résultats de calcul de la section minimale est que la relation de Barrée et Conway donne des valeurs éloignées des 3 autres. Il s'agit en premier lieu d'une relation empirique ayant trois paramètres de calage qui sont la K_{mr}, K_{min} m^2 et T m^{-1}. Le paramètre K_{mr} dépend de la perméabilité de Darcy K_d m^2. Ceci augmente les sources d'erreur pour cette relation. La relation d'Ergun (1952) donne des valeurs proches de celles trouvées pour la relation de Stephenson (1979) (conduisant à des sections minimales), par contre elle contient deux constantes de calage qui ne sont pas des paramètres physiques. Tandis que la relation de Forchheimer (1901) se base sur un seul paramètre physique de calage, et ayant une forme de calcul de perte de charge en $AV+BV^2$, (le premier terme en V concerne les écoulements Darcéens où les effets inertiels sont négligeables alors que la partie en V^2 concerne les écoulements pour lesquels les effets inertiels ne sont plus négligeables, voire dominants), permettant de couvrir les différentes gammes d'écoulement. Ceci la rend pratique et aisément utilisable pour simuler les écoulements dans les milieux poreux.

La modélisation numérique consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant un phénomène étudié. En variant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique qui est dans notre cas l'écoulement dans un milieu macroporeux. Après la simulation des expériences dans le grand canal de l'INAT, on a modélisé ces dernières par la relation de Richard (décrite ci-après) sur le logiciel COMSOL.

I.4.7 Modélisation des lignes d'eaux expérimentales

Les flux d'eau dans un milieu poreux et variablement saturé sont décrits classiquement par l'équation de Richards (1931). Cette équation générale des écoulements en milieu non saturé résulte d'une combinaison de la loi de Darcy, étendue aux milieux non saturés, et de l'équation de continuité. La perméabilité dépend alors de l'état de saturation, et l'on négligera les transports dans le gaz, en prenant l'hypothèse que le gradient de pression dans le gaz est nul.

Dans les milieux partiellement saturés, la loi de Darcy peut être modifiée en exprimant la perméabilité K_d, et la pression capillaire p_c en fonction de la saturation du milieu tout en

considérant l'effet de la gravité par la relation suivante (Richards 1931, Phillip 1955, Gardner 1958, Dullien 1991, Landeryou et al. 2005) :

$$V = -k_d(S)(\nabla pc(S) + \rho g \sin\alpha) \quad (42)$$

Avec : V est la vitesse de Darcy, S est la saturation en phase liquide. En appliquant l'équation de la continuité pour l'écoulement en milieu poreux on obtient (Ashari 2010):

$$n\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla V = 0 \quad (43)$$

La combinaison des deux équations 42 et 43 donne l'équation de Richard qui permet de simuler un écoulement non linéaire dans un milieu poreux en pente.

$$n\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(-k_d(S)\frac{\partial p_c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-k_d(S)\frac{\partial p_c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(-k_d(S)\rho g \sin\alpha\right) = 0 \quad (44)$$

On a modélisé les écoulements des expériences réalisées dans le grand canal avec les deux milieux poreux étudiés. Dans un premier lieu, on a modélisé les lignes d'eau avec une valeur constante de la perméabilité et ça a donné une allure de profil d'eau semblable à celle obtenue expérimentalement, mais en comparant les résultats, on a trouvé un certain décalage entre les résultats de modélisation et ceux expérimentaux, on a donc changé l'expression de la perméabilité dont la valeur change avec la valeur du nombre Reynolds ou de la section. Pour les expériences réalisées avec des cailloux de diamètre moyen d=1cm, on a obtenu les lignes d'eau suivantes.

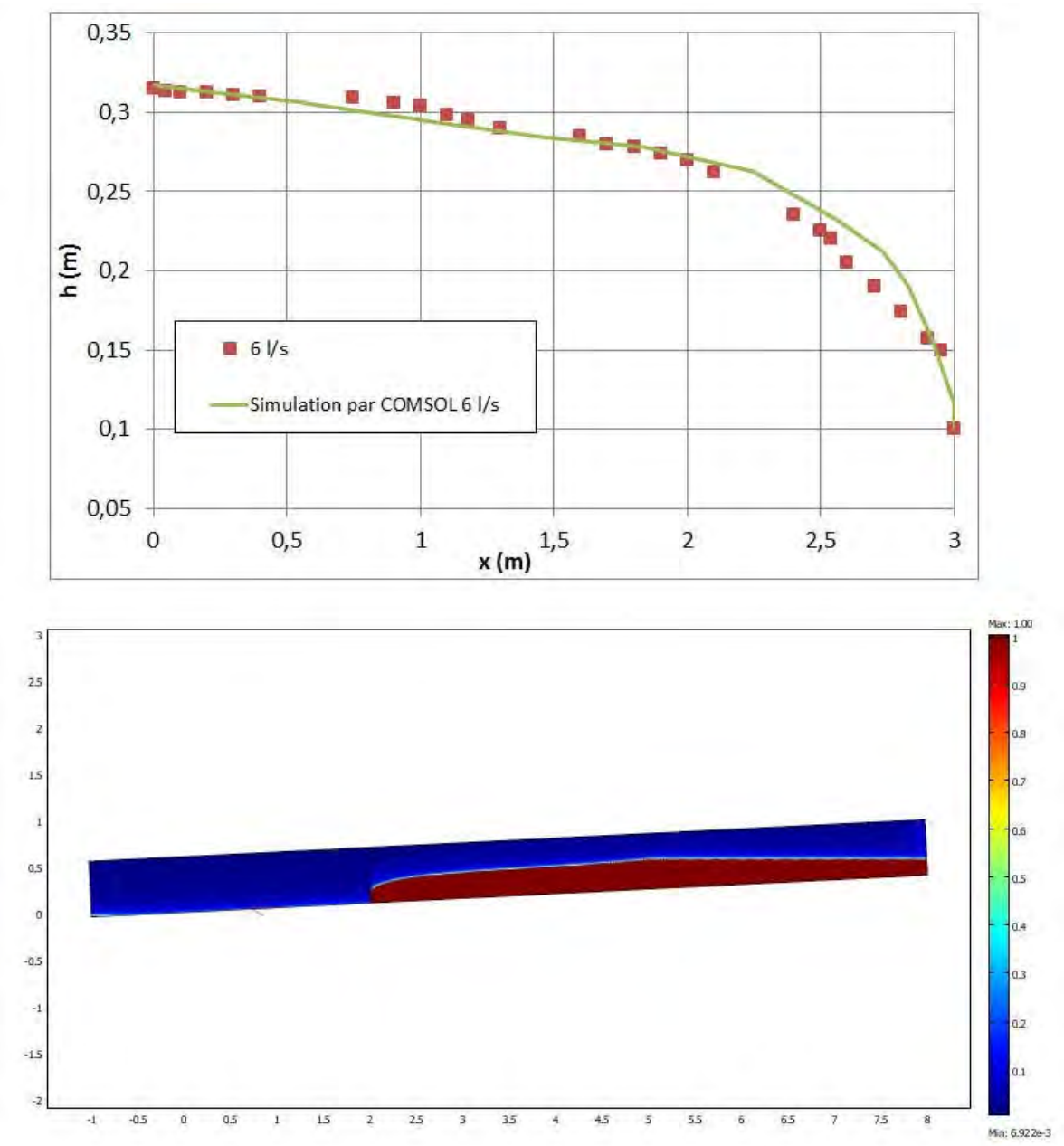


Figure 1.4.25 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 6 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm

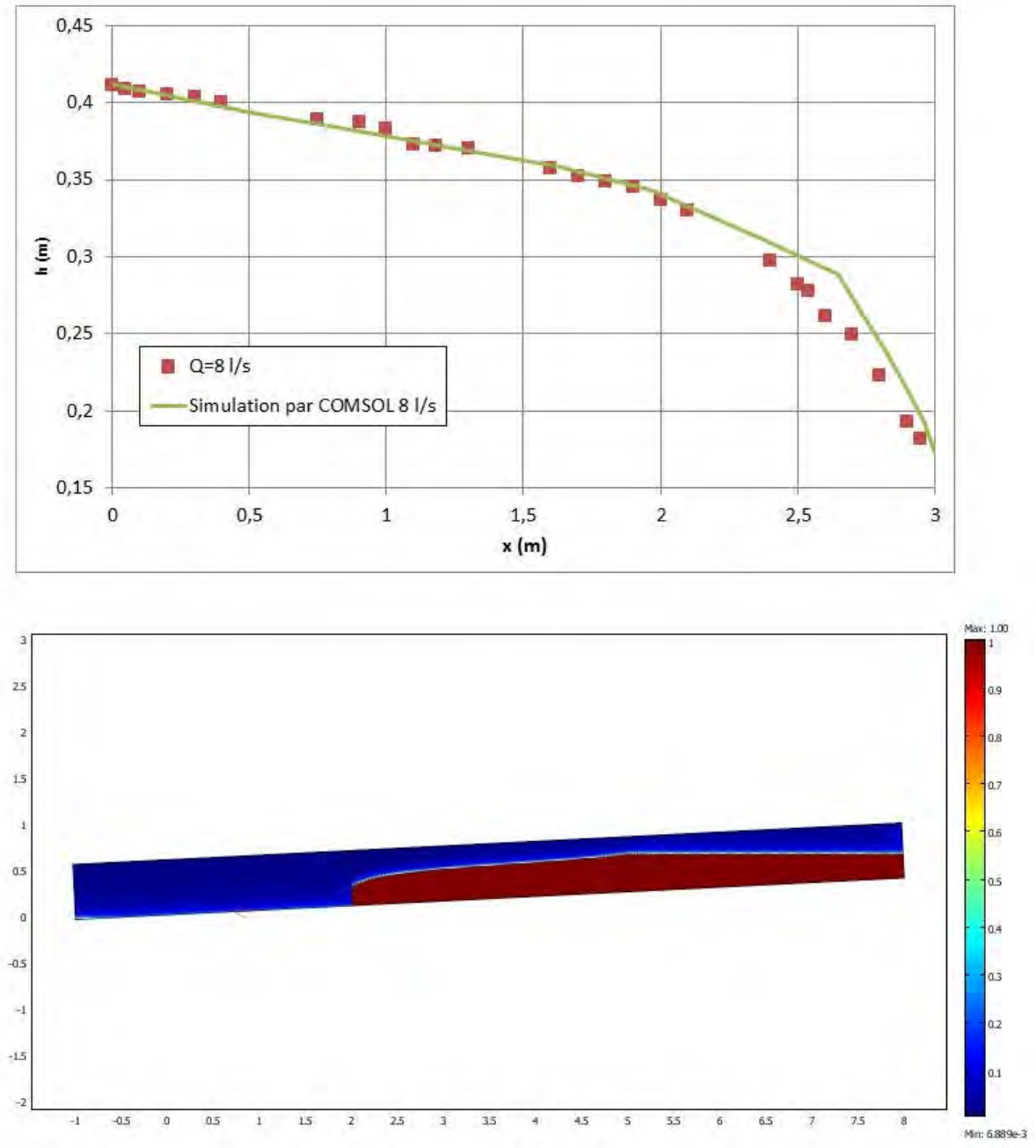


Figure I.4.26 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 8 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm

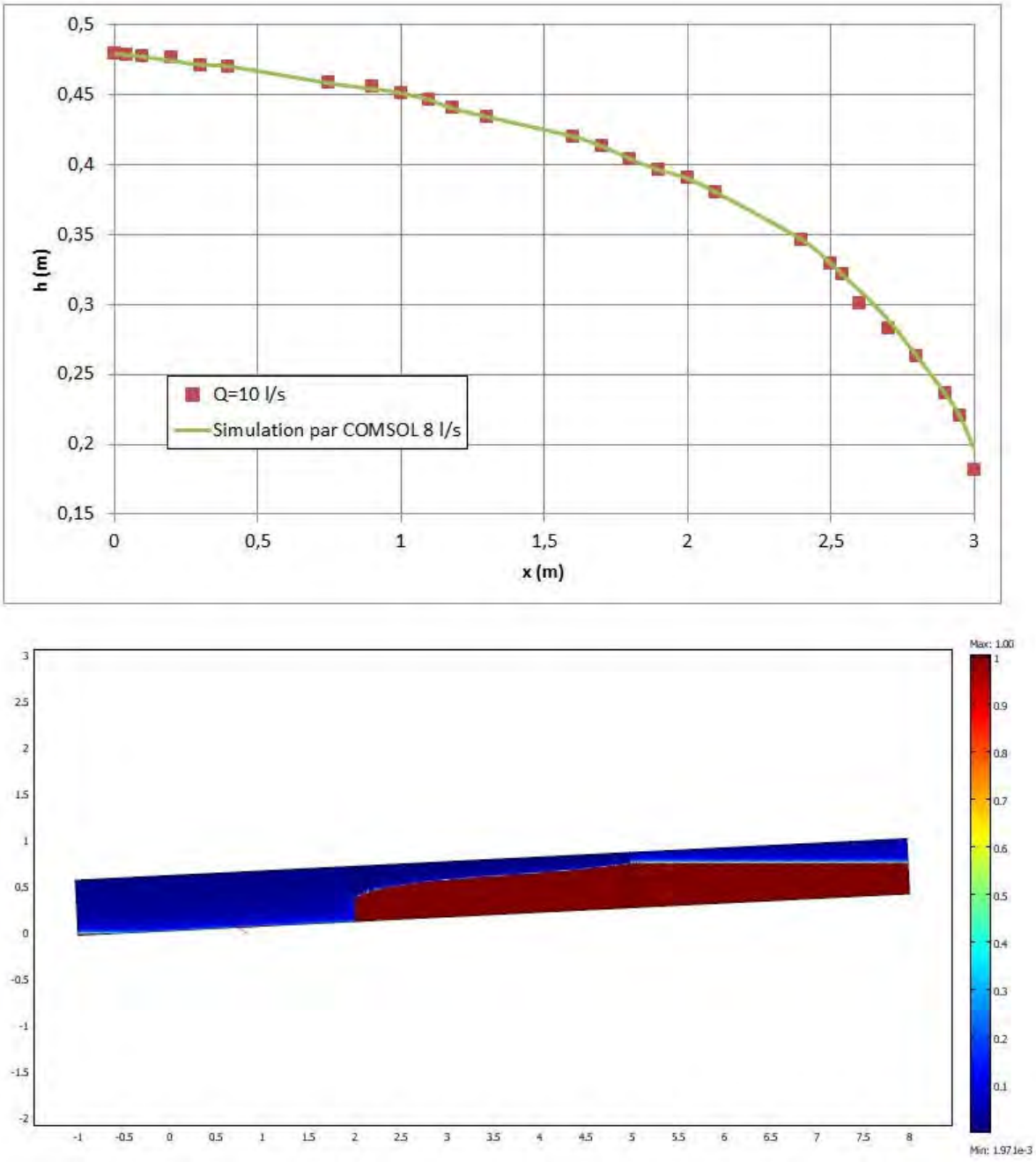


Figure 1.4.27 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 10 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm

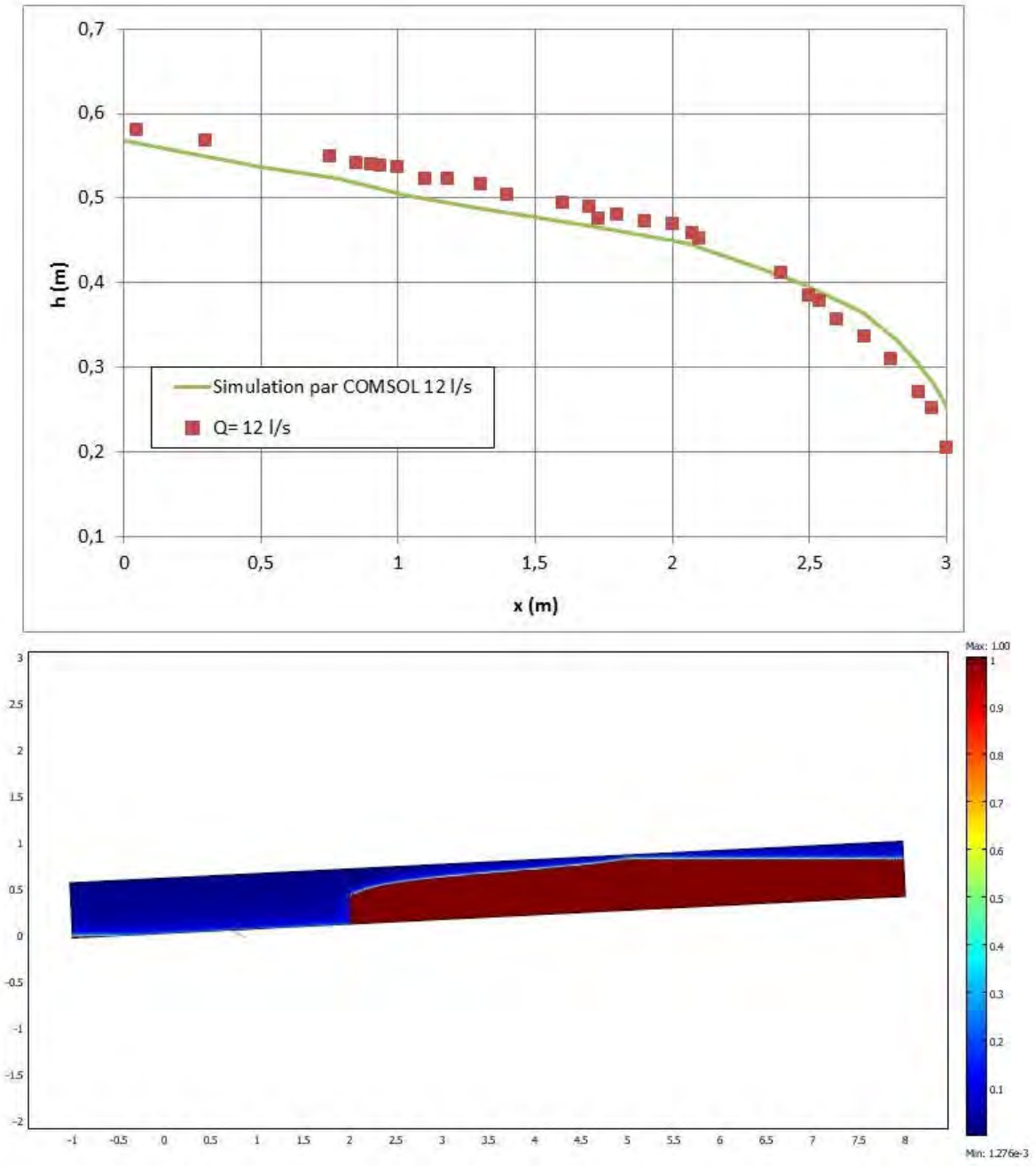


Figure 1.4.28 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 12 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm

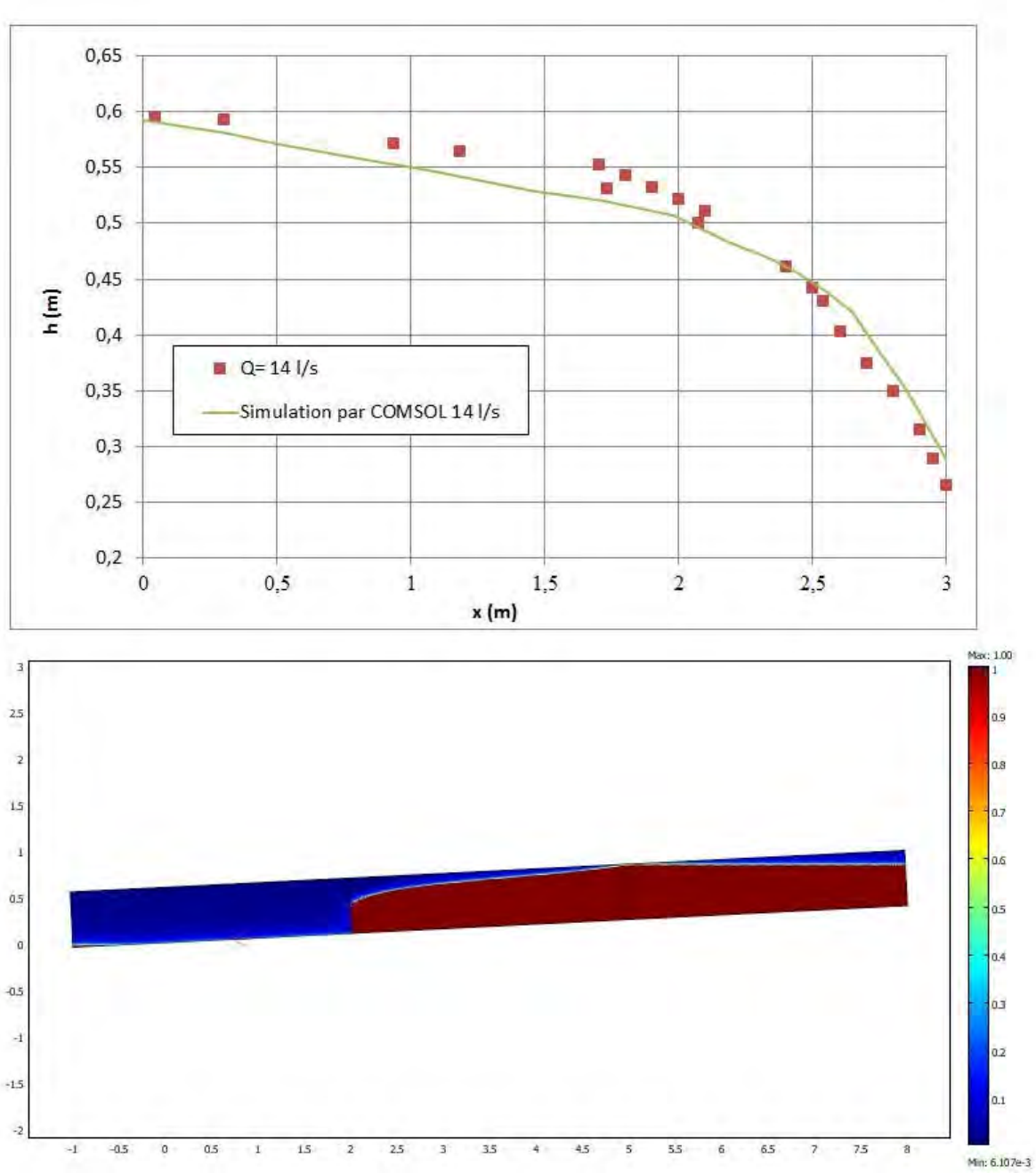


Figure 1.4.29 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 14 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm

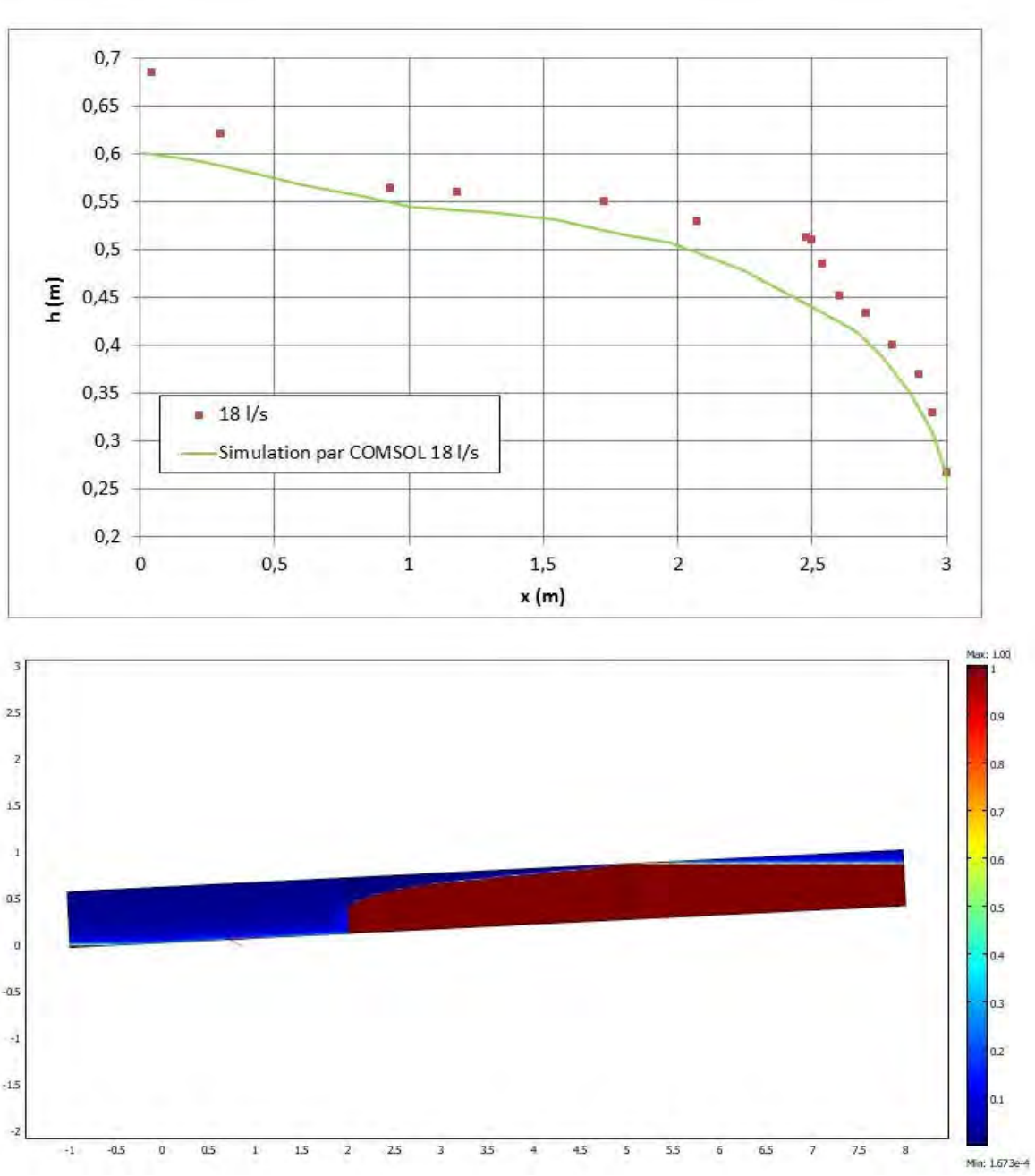


Figure 1.4.30 : Comparaison de la ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 18 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=1cm

Les figures I.4.25 – I.4.30 présentent les résultats des débits 6, 8, 10, 12,14 et 18 l/s, et on peut remarquer que les lignes d'eau modélisées par COMSOL reproduisent fidèlement les lignes d'eau expérimentales. Pour chaque expérience, on a présenté les figures obtenues par COMSOL et à partir desquelles on peut déduire que ce modèle reproduit même la forme de la ligne d'eau à la sortie du milieu poreux là où on remarque une accélération de vitesse de

l'écoulement. Ceci peut marquer un passage de l'écoulement graduellement varié à un écoulement graduellement accéléré.

De même, on a modélisé les expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=15 cm. Pour cette taille de cailloux la perte de charge n'est pas très importante ce qui fait que même avec le débit le plus important qui est Q=44 l/s, on a obtenu un écoulement à surface libre alors que pour les cailloux de diamètre moyen d=1cm, on a obtenu un écoulement en charge à l'entrée du milieu poreux à partir d'un débit Q=18 l/s.

On présente ci-après, les résultats de la modélisation de ces expériences avec le logiciel COMSOL.

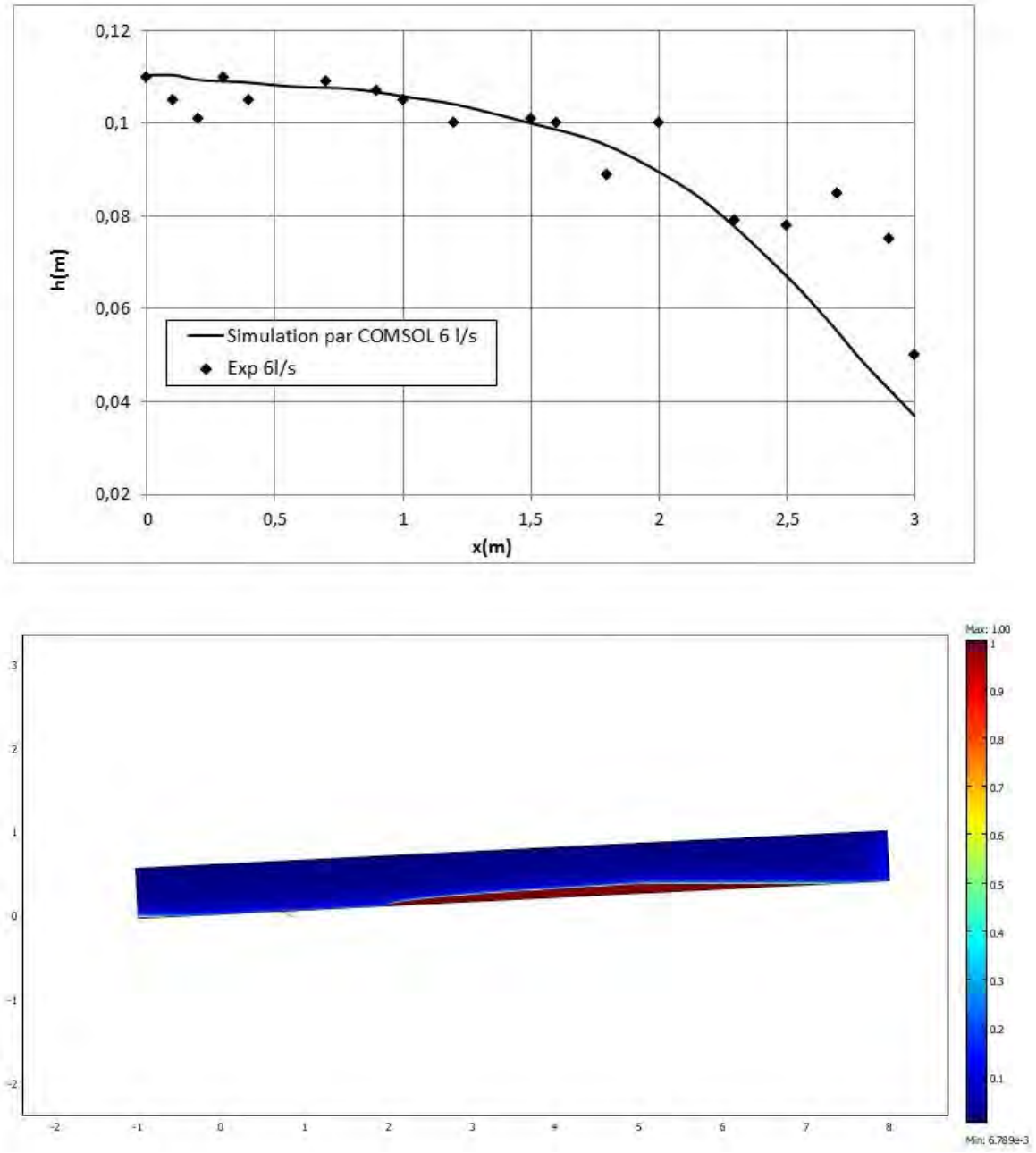


Figure I.4.31 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 6 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

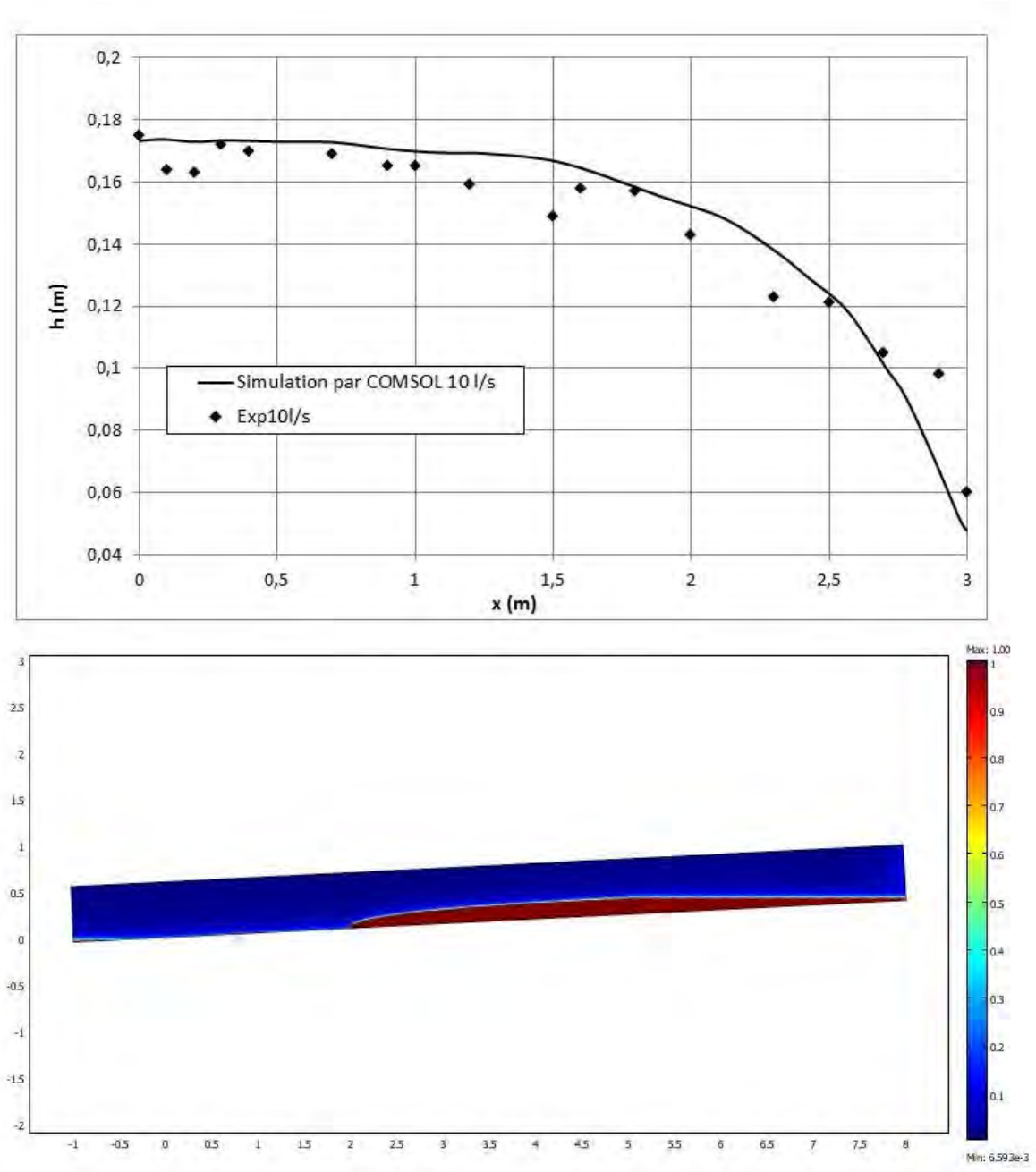
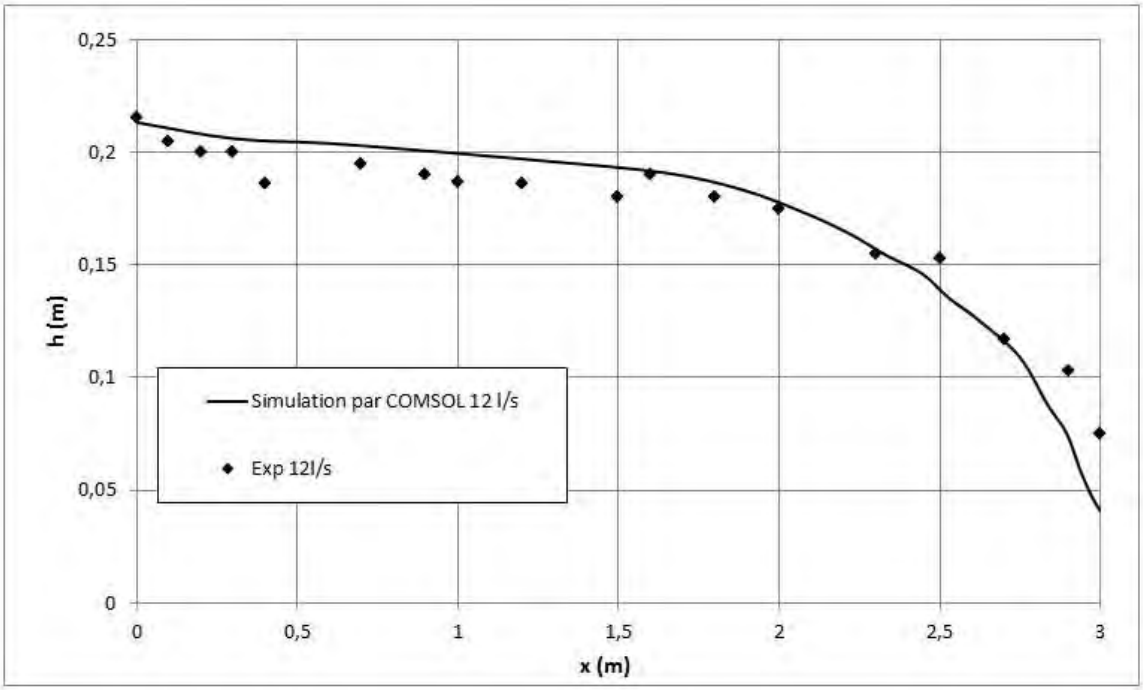


Figure I.4.32 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 10 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm



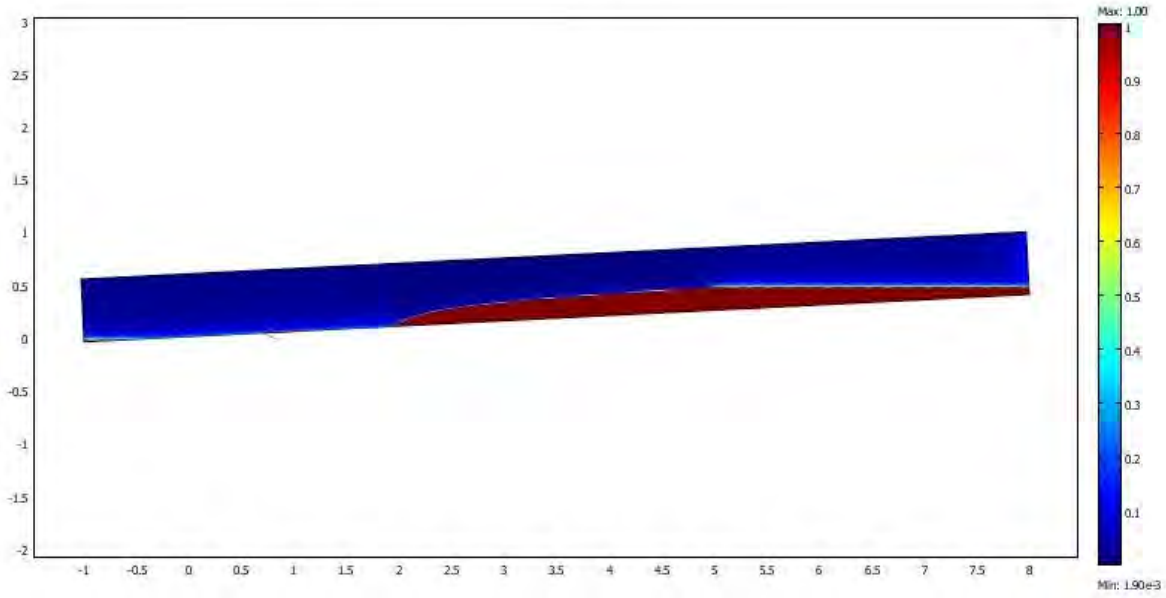


Figure I.4.33 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 12 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

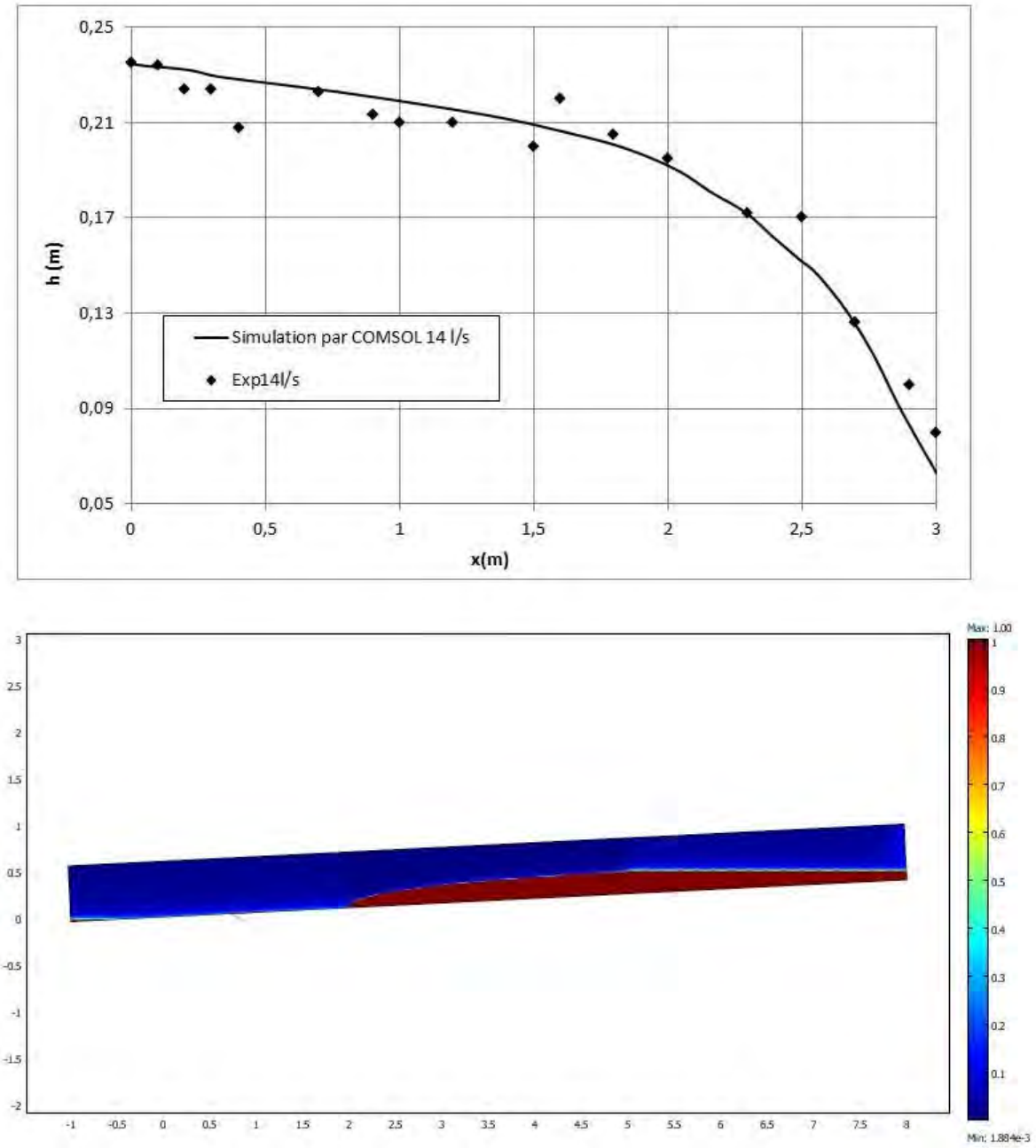


Figure I.4.34 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 14 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

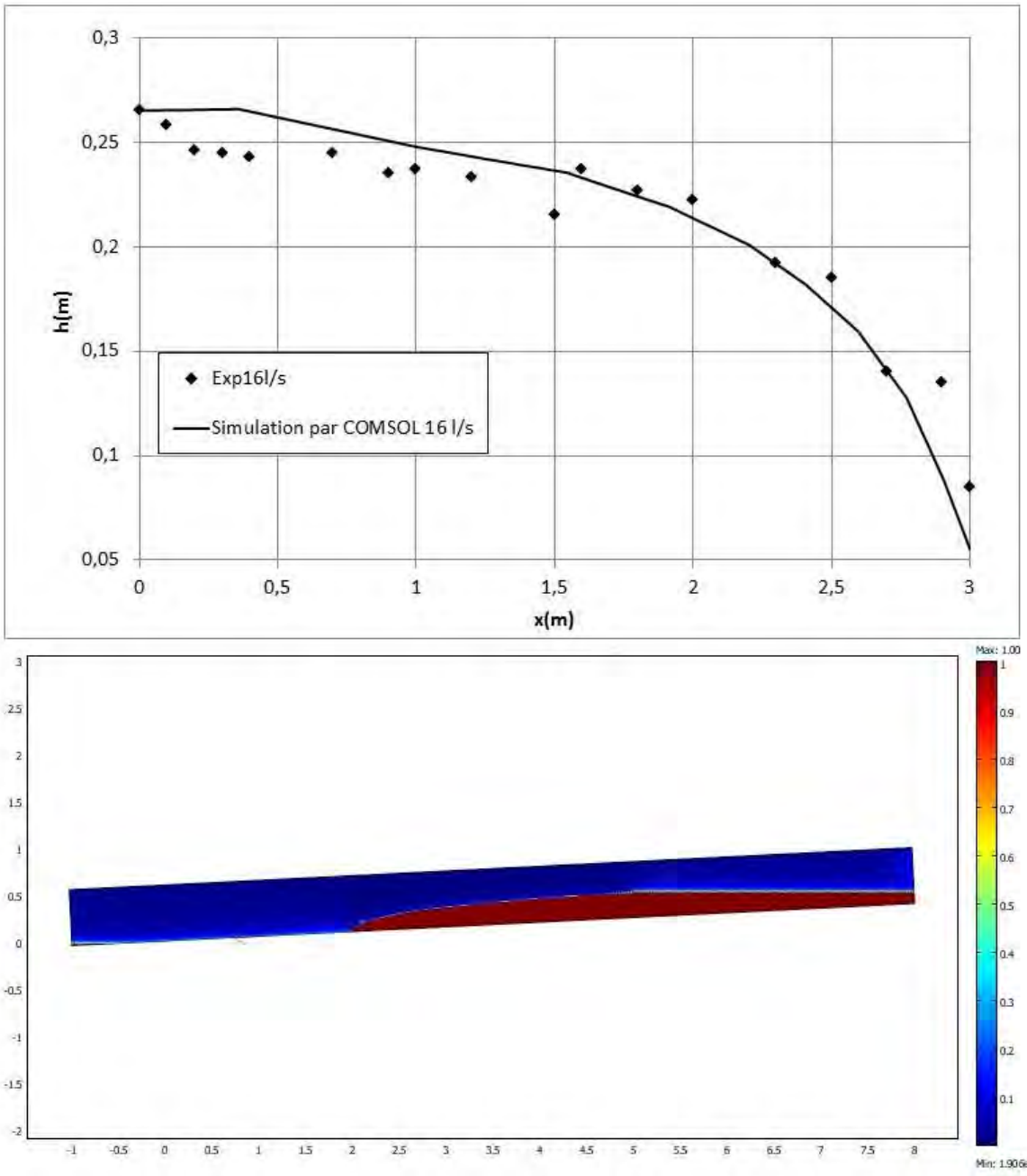


Figure I.4.35 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 16 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

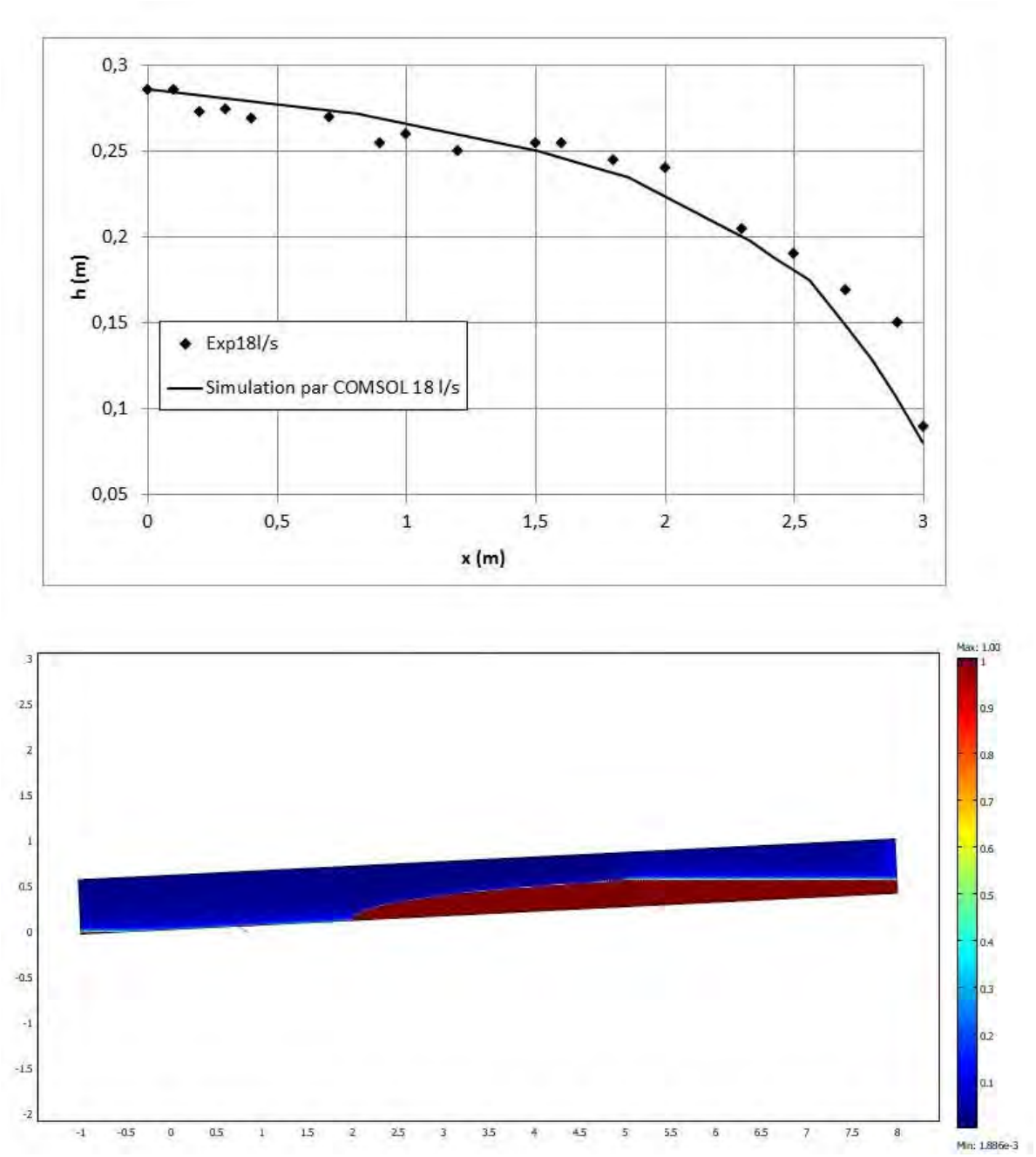


Figure I.4.36 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 18 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

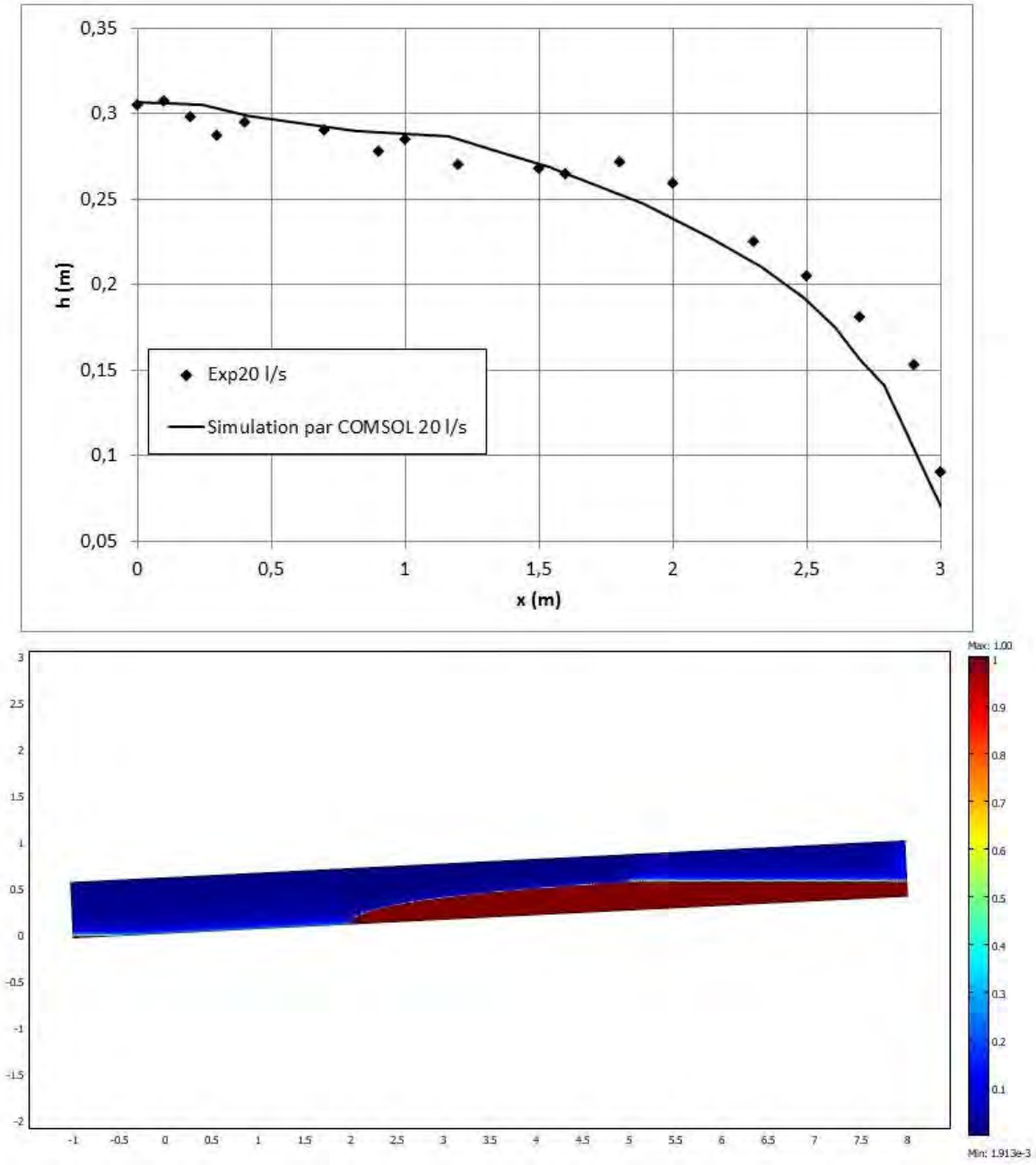


Figure I.4.37 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 20 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

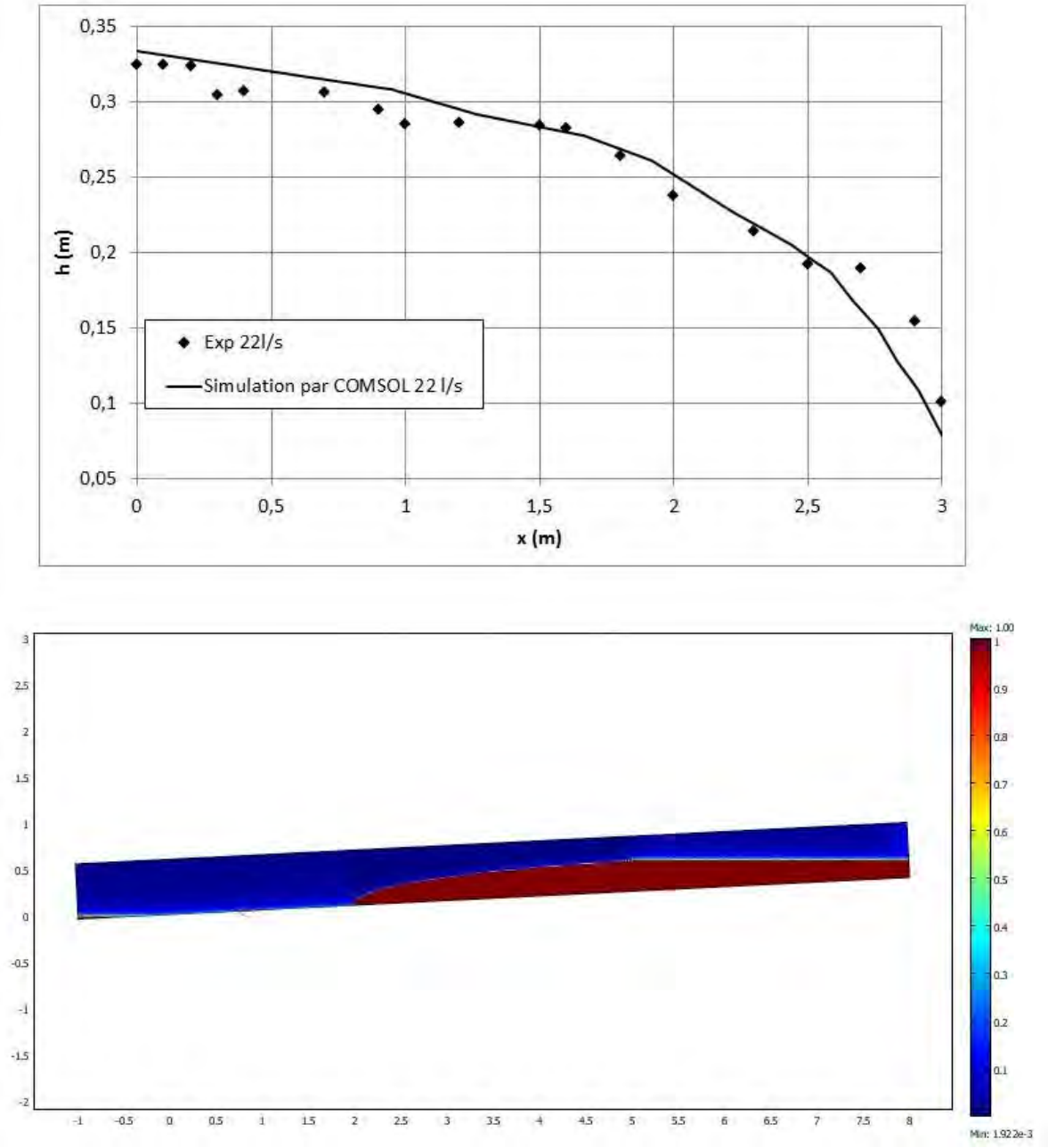


Figure I.4.38 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 22 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

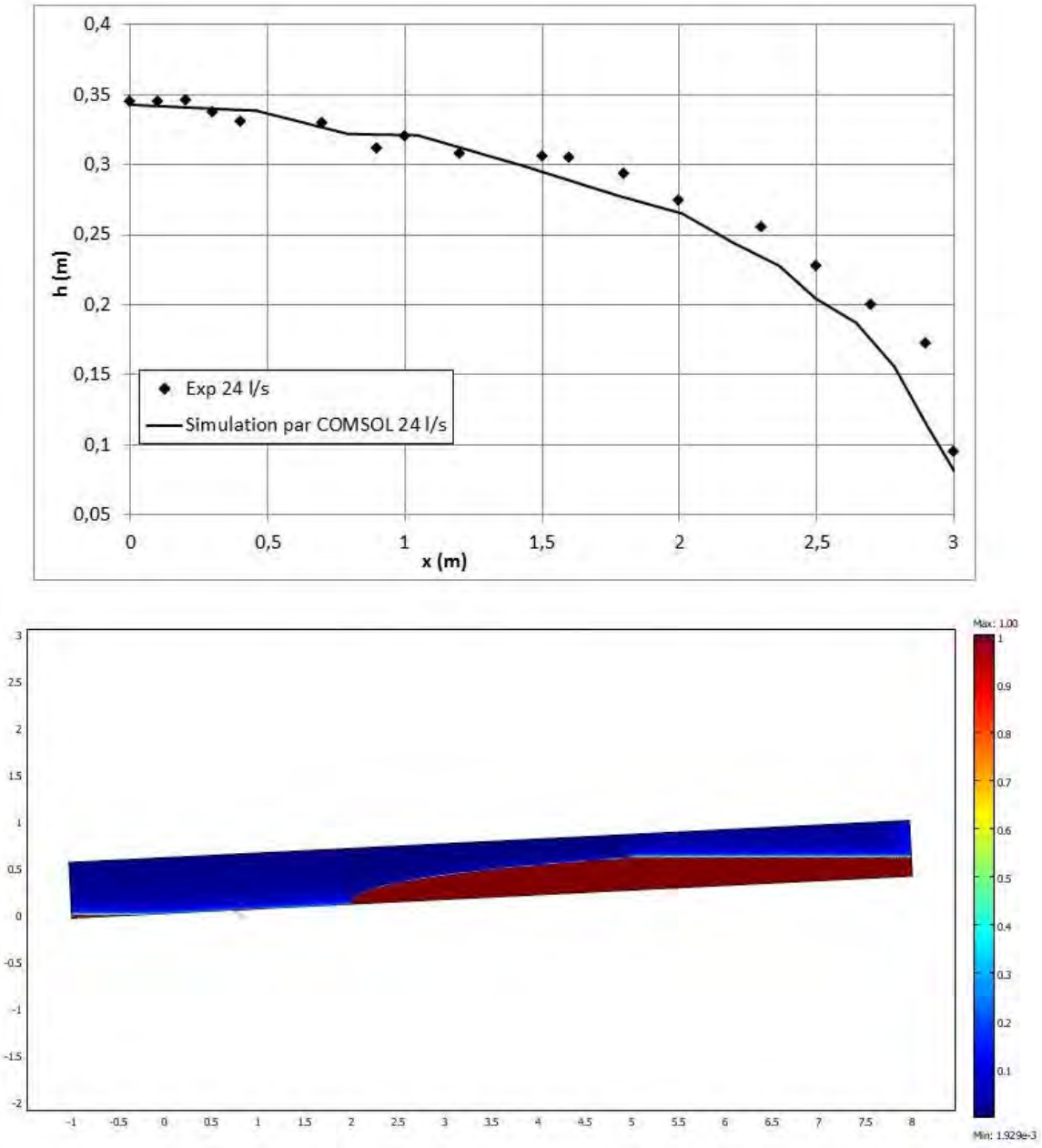


Figure I.4.39 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 24 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

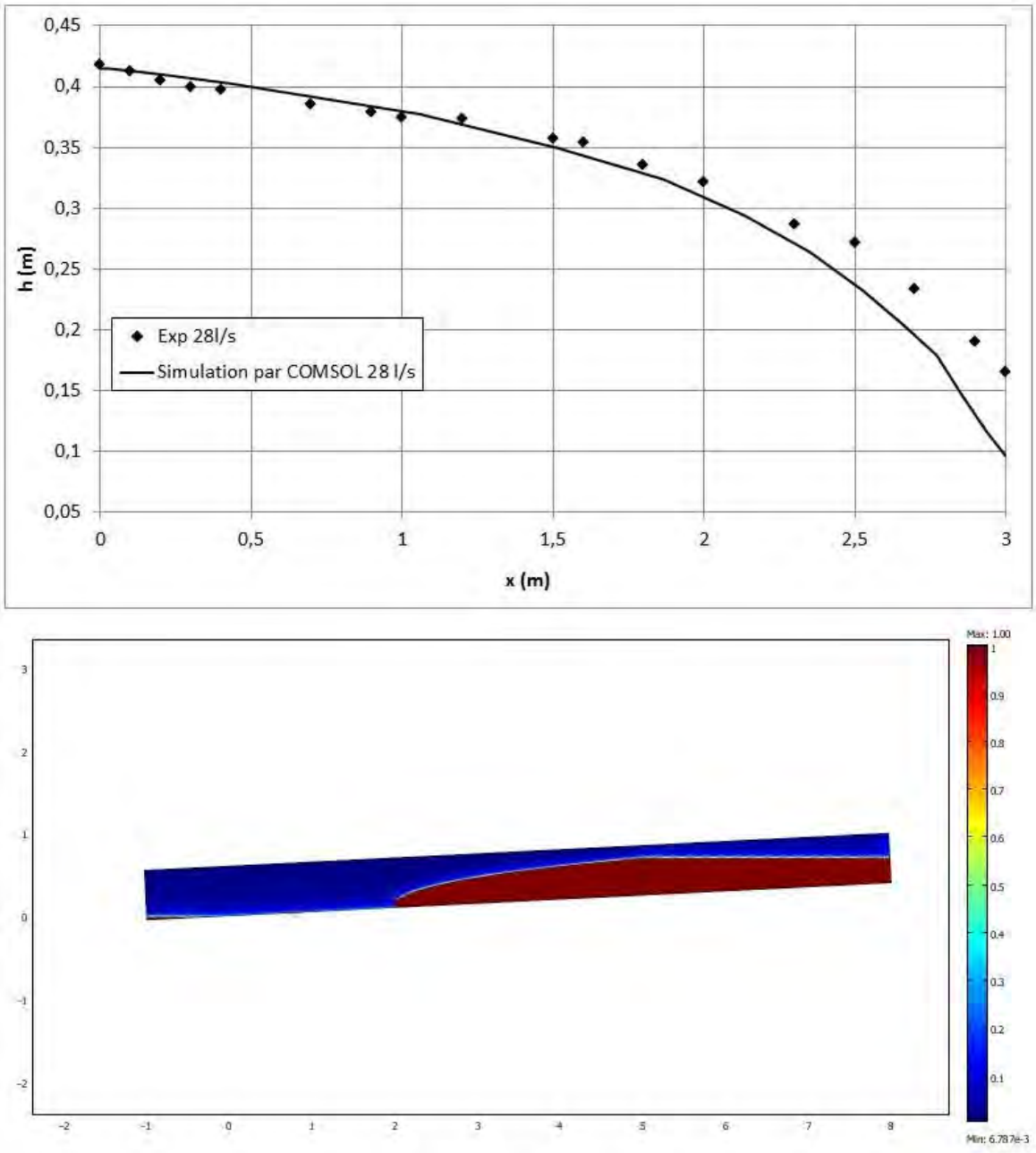


Figure I.4.40 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 28 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

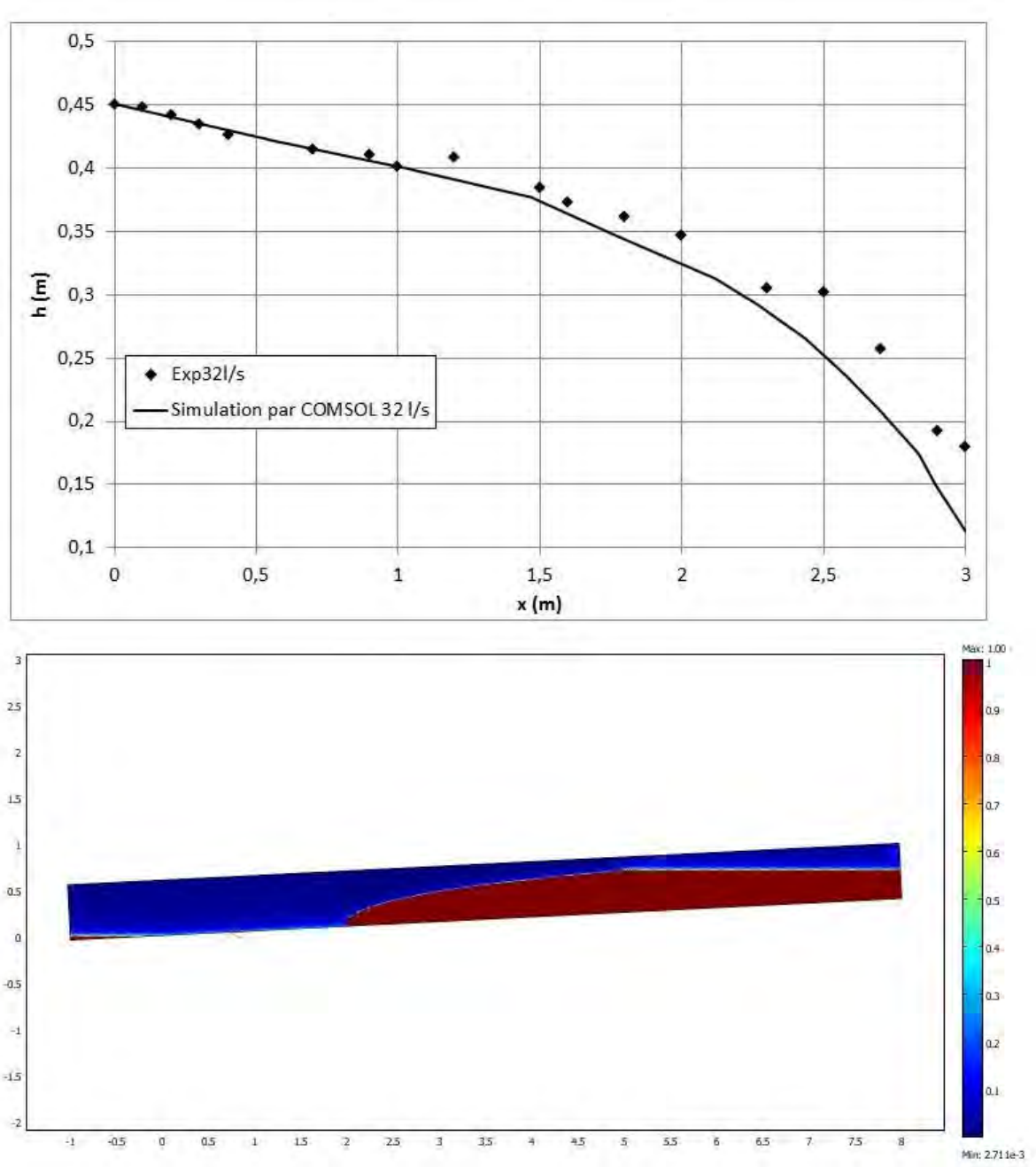


Figure I.4.41 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 32 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

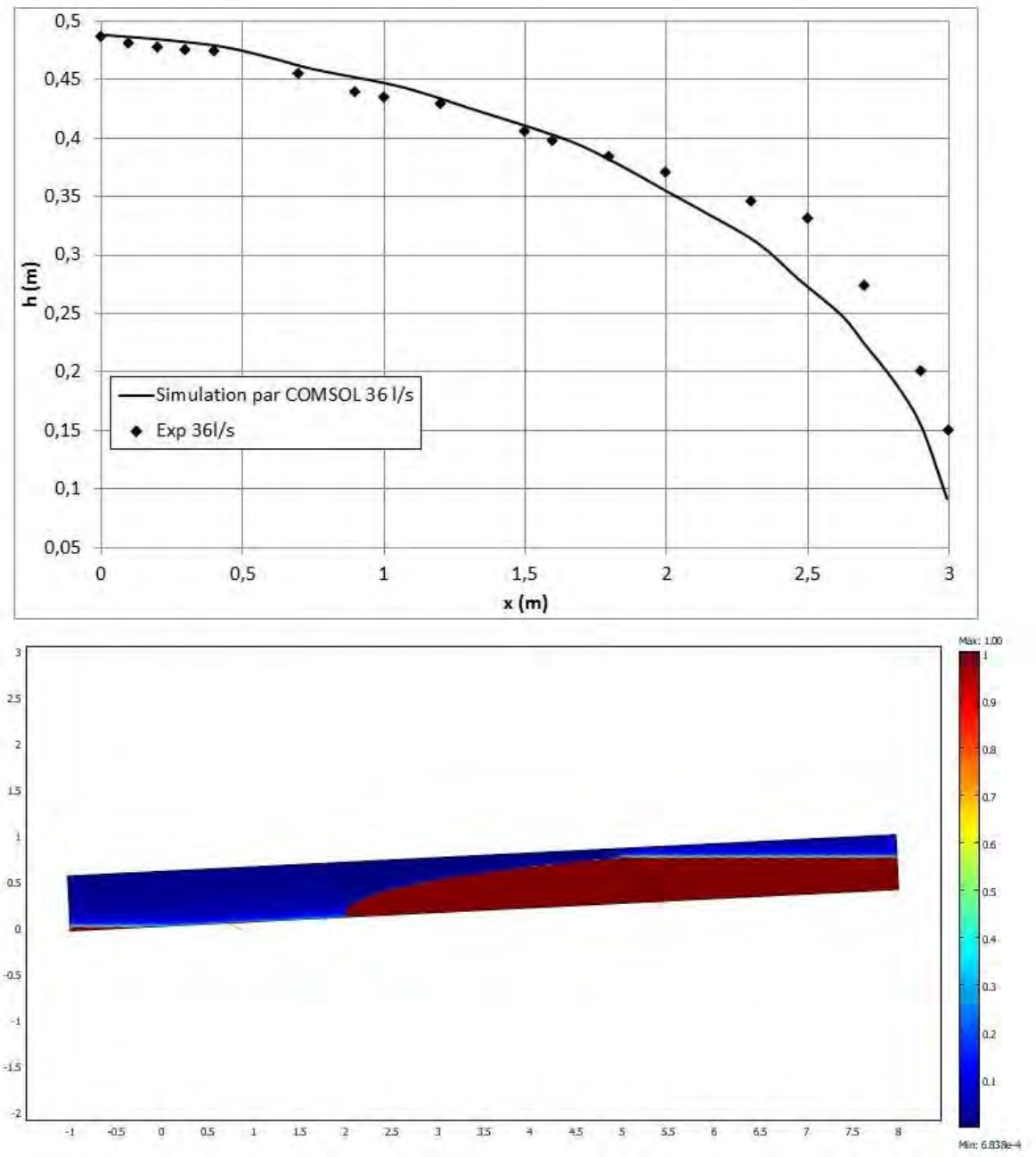


Figure I.4.42 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 36 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

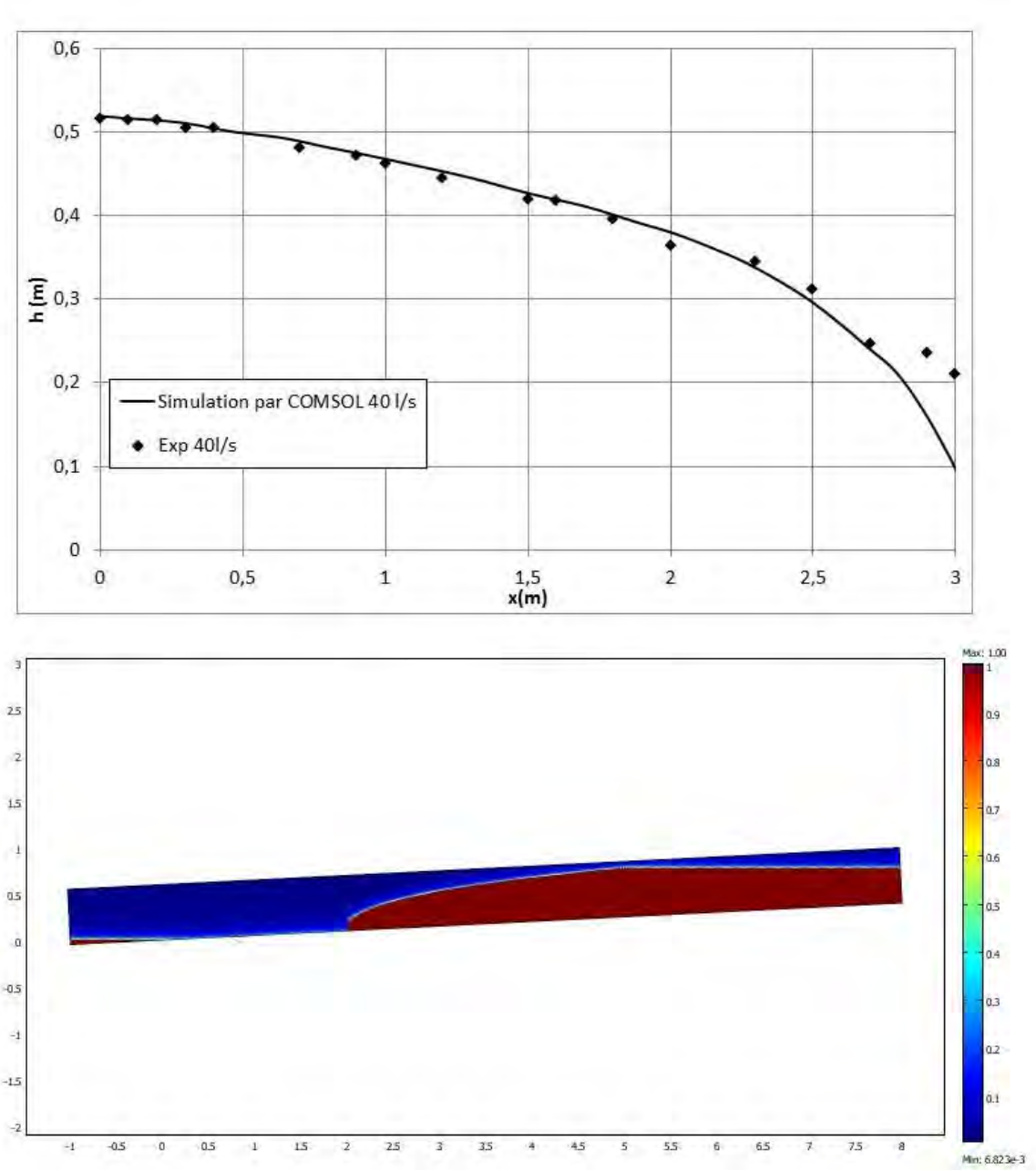


Figure I.4.43 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 40 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

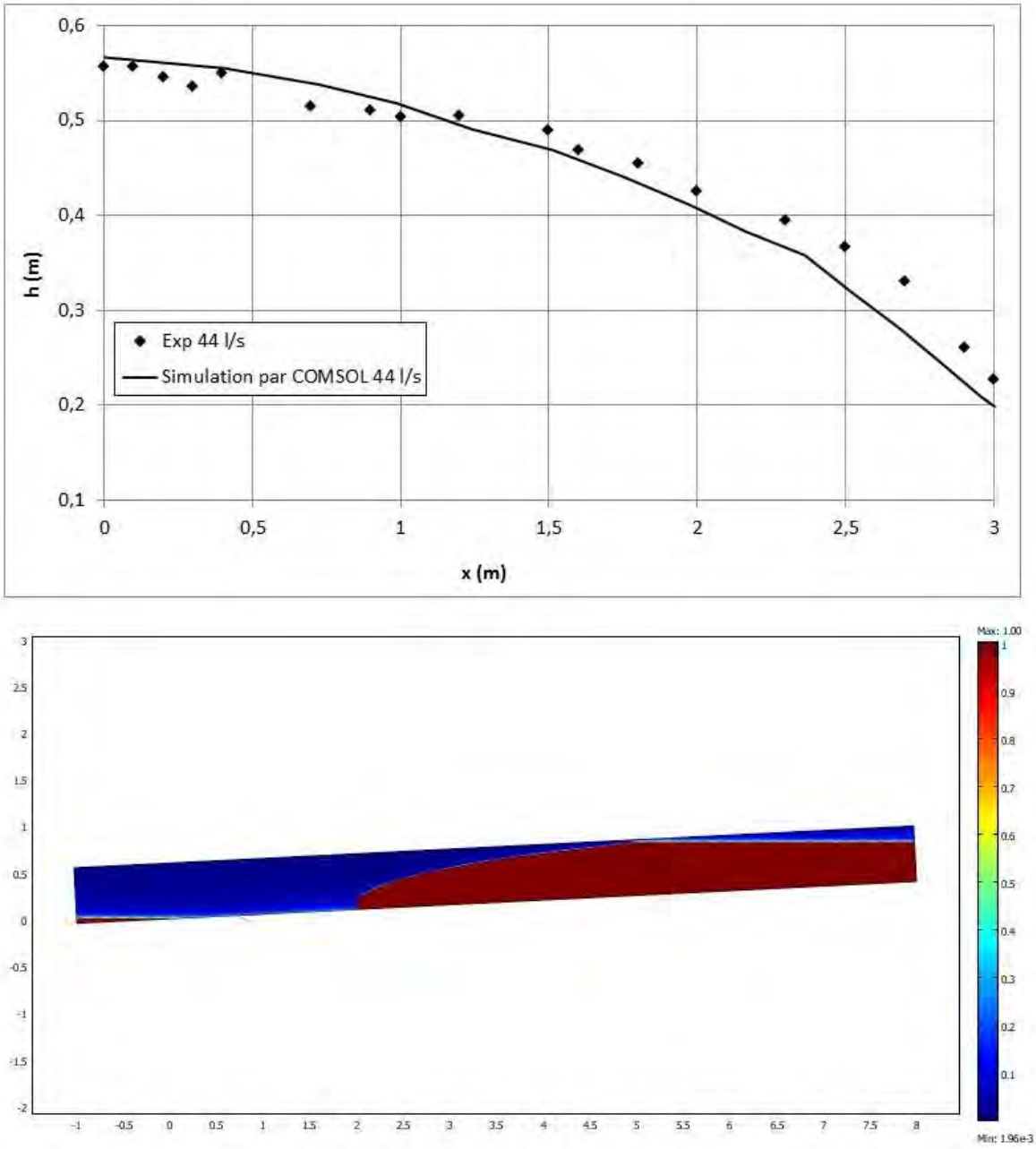


Figure I.4.44 : Comparaison ligne d'eau expérimentale et modélisée par COMSOL pour le débit Q= 44 l/s en cas du milieu poreux constitué des cailloux de diamètre moyen d=15cm

Pour ces expériences réalisées avec les cailloux de diamètre moyen d=15 cm, le modèle développé sous COMSOL avec une perméabilité qui varie par zone (en fonction du nombre de Reynolds) permet de reproduire la ligne d'eau pour tous les débits. Pour chaque simulation, la valeur de perméabilité a été ajustée en utilisant les résultats obtenus précédemment via l'expérience.

II. PARTIE 2

ETUDE QUALITATIVE DU TRANSPORT SEDIMENTAIRE DANS LES MILIEUX MACROPOREUX

II.1 Chapitre 1

Synthèse bibliographique

II.1.1 Introduction

Dans cette deuxième partie, on va étudier qualitativement le transport et le dépôt des particules dans un milieu macroporeux, par mesure de la charge en sédiment à l'entrée et à la sortie de ce dernier. L'objectif de l'étude est de visualiser l'effet de colmatage du milieu poreux sur sa perméabilité et par conséquent, sur l'écoulement.

On présente ci-après quelques lois concernant le transport et le dépôt dans les milieux poreux existantes dans la littérature.

En effet, le nombre des études s'intéressant au problème de transport sédimentaire dans les milieux macroporeux est très limité.

II.1.2 Les équations régissant le phénomène de transport dans les milieux poreux

La majorité des études sur le transport des particules dans les milieux poreux a été réalisée sur des milieux sableux. On ne trouve pas beaucoup de références à des études faites sur des milieux macroporeux. Plusieurs facteurs hydrodynamiques et paramètres physiques affectent le phénomène de transport des particules dans le milieu poreux qui sont :

- la vitesse de l'écoulement de telle sorte qu'une faible vitesse favorise le dépôt des particules à l'entrée du milieu entrainant ainsi le colmatage de ses pores, (Alem et al.. 2009; Compère et al. 2000; Reddi et al. 2000) alors que pour des vitesses plus importantes le dépôt des particules se fait plutôt à l'intérieur du milieu poreux,
- la perméabilité du milieu,
- la concentration et la taille des particules fines,
- la structure du milieu poreux (la distribution granulométrique des grains constituant le milieu poreux,
- la distribution porale du milieu,
- la surface et la rugosité de surface des grains et
- les caractéristiques du fluide transporteur (Ahfir et *al.,* 2009 ; Lenhart & Saiers, 2003 ; Porubcan &Xu, 2011 ; Hosseini & Tosco, 2013 ; Bennacer et *al*., 2013 ; Raychoudhury et *al.,* 2014 ; Bradford et al.., 2003, Hammadi 2016).

Il a été démontré que pour les grandes particules en suspension (> 10 μm), les effets hydrodynamiques, gravitaires et inertiels dominent (Frey *et al.* 1999).

Le modèle des équations de convection-dispersion où on suppose que le milieu poreux est le siège d'un écoulement uniforme où le soluté se propage par un flux dispersif analogue à la diffusion est le modèle qui permet de décrire ce phénomène de transport de la matière dans les milieux poreux (Corapsioglu et wang 1999, Lominé 2007, Chen et *al.* 2009). Cependant, les observations de la migration du soluté dans les milieux poreux naturels ont constamment montré des écarts par rapport à la prédiction de ce modèle [Silliman et Simpson 1987, Adams et Gelhar 1992, Maier et *al*.n 2000, Cortis et Berkowitz 2004, Zhang et Kang, 2004].
Le mécanisme de transport des particules dans un milieu poreux est contrôlé par quatre phénomènes. Ils sont présentés par la suite.

II.1.2.1 La convection

La convection est encore appelée advection. C'est le phénomène de transport piloté par l'écoulement. Par conséquent, cela entraine des particules dans le milieu poreux. Ce mouvement de déplacement est directement proportionnel à la vitesse de l'écoulement de l'eau. Si les particules ne réagissent pas avec le milieu, la vitesse de transport est dans ce cas celle de l'écoulement (Ramasomanana 2012). Dans le cas d'un écoulement monodimensionnel, ce mouvement est décrit par la relation suivante :

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = -V_x \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \qquad (45)$$

Avec C(x,t) est la concentration du sédiment et V_x est la vitesse d'écoulement.

II.1.2.2 La dispersion cinématique

A cause de la variation de taille des pores pour des raisons d'assemblage, par exemple, dans le cas d'un milieu poreux homogène ou dans le cas d'un milieu poreux hétérogène, la vitesse de l'écoulement varie dans la structure du pore. Elle est maximale dans les cœurs du fluide et minimale sur les parois ce qui peut provoquer une variation de concentration des particules dans un pore.

II.1.2.3 La diffusion moléculaire

C'est le phénomène d'interaction des particules de la matière en suspension entre elles indépendamment du mouvement de l'écoulement. Ce phénomène est négligeable sauf dans le cas de très faibles vitesses.

II.1.2.4 La dispersion hydrodynamique

Les deux phénomènes de dispersion cinématique et de diffusion moléculaire sont reliés par les relations suivantes avec un coefficient de dispersion commun D (De Marsily 1986).

$$\begin{aligned} D_L &= \alpha_l V_p + D_{eff} \\ D_T &= \alpha_t V_P + D_{eff} \end{aligned} \quad (46)$$

Avec D_L et D_T représentent le coefficient de dispersion longitudinale et transversale, α_L et α_T (m) sont, respectivement, les dispersivités longitudinale et transversale, V_p est la vitesse moyenne dans les pores et D_{eff} est le coefficient de diffusion effectif dans le milieu poreux. La dispersivité longitudinale est un paramètre lié à la morphologie du milieu poreux (Brissaud 1983).

II.1.2.5 L'équation de Convection-dispersion

En tenant compte des phénomènes de transport des particules dans les milieux poreux et en ajoutant un terme source, la relation de convection dispersion s'écrit de la forme suivante (Lominé 2009):

$$\frac{\partial C(r,t)}{\partial t} - \mathrm{div}\left(D\,\mathrm{grad}\,C(r,t) - \vec{V}\,C(r,t)\right) = Q \quad (47)$$

II.1.3 Etudes expérimentales de transport et dépôt dans les milieux poreux

La définition du protocole et de dispositif expérimental de chaque étude dépend des objectifs de cette dernière. Certains auteurs s'intéressaient à l'étude de l'évolution de la perméabilité du milieu en fonction du dépôt des particules, donc à l'étude du colmatage. D'autres ont étudié le phénomène d'arrachage en déterminant le gradient hydraulique critique à partir duquel il y a une remise en suspension des particules déposées et c'est ce qui intéresse MECATER. Mais, malheureusement, on n'a pas pu réaliser une étude complète par manque de moyens dans notre cas. On présente dans ce qui suit quelques études de transport et dépôt sédimentaire dans des milieux macroporeux.

II.1.3.1 Etude de colmatage dans les milieux poreux

Ce type d'étude est en général réalisé dans l'objectif de caractériser ou d'étudier l'évolution dans le temps de la structure d'un milieu poreux tels que les aquifères souterrains, les réservoirs de pétrole et les lits de sédiments, (Chen *et al.* 2009), mais aussi pour prédire la

durée de vie d'un filtre à sédiment dans les conduites d'eau ou dans un forage pétrolier ou hydraulique…. Il a été démontré que l'accumulation des particules dans un milieu poreux réduit fortement la perméabilité de milieux et augmente sa tortuosité, et que les dépôts colloïdaux augmentent la variabilité spatiale des vitesses interstitielle de l'eau, conduisant ainsi à avoir des coefficients de dispersion plus élevés. (Chen *et al.* 2009)

La grande difficulté rencontrée est de déterminer la concentration du sédiment déposé à une position donnée en profondeur du milieu poreux. Parmi les méthodes utilisées il y a l'utilisation de l'imagerie 3D pour illustrer temporellement, l'évolution de la structure du milieu étudié à n'importe quelle position.

Dans la majorité des études, les équations directrices consistent en une équation de bilan de masse pour l'écoulement de la suspension couplée à une vitesse de Darcy, et les équations pour la modélisation du transport et du dépôt des particules.

II.1.3.2 Etude de transport des particules dans les milieux macroporeux

Comme écrit précédemment, les études relatives au transport solide dans les milieux macroporeux ne sont pas nombreuses. Ces études s'intéressent au transport dans les ouvrages en enrochement tels que les barrages en terre et les murs de soutènement. L'objectif commun est de déterminer un gradient hydraulique critique i_c qui correspond au gradient hydraulique à partir duquel il y aura remise en suspension des particules déposées. Notons que la majorité d'entre elles se sont basées sur la relation de Sakthivadivel (1969) pour le calcul de ce gradient hydraulique critique i_c.

$$i_c = k_c 2(G_s - 1)gd(\cos\theta \tan g\phi - \sin\theta) \quad (48)$$

Avec : K_c est un coefficient déterminé par les expériences, G_s : densité relative des particules de sédiments, d ou d_S : diamètre des sédiments, θ : la pente du canal et ϕ : l'angle de dépôt des sédiments.

Sakthivadivel (1969) a défini cette relation pour des écoulements laminaires. Dans notre cas, l'écoulement est turbulent. Afin d'étendre les résultats précédents, les recherches ont porté sur des formulations en vitesse en puissance pour le cas des écoulements turbulents.

II.1.3.3 L'étude de Jafar Chapokpour et Ebrahim Amiri Tokaldany (2012)

Le fonctionnement d'un barrage installé sur une rivière est affecté par la concentration en sédiments dans l'eau. Pour assurer le bon fonctionnement de cet ouvrage, il doit être construit

de manière à maintenir un gradient hydraulique plus grand que le gradient hydraulique critique. Ceci était la motivation de l'étude réalisée. Alors, pour définir une formule du gradient hydraulique critique Jafar Chapokpour et Ebrahim Amiri Tokaldany (2012) se sont basés sur les résultats des trois chercheurs cités dans le tableau ci-après :

Tableau II.1.1 : caractéristiques expérimentales des données utilisées

nom du chercheur	numéro des diamètres utilisés	d50 du diamètre moyen (mm)	d50 du diamètre de sédiment (mm)	Re	longueur, largeur et hauteur du milieu poreux
Samani and Emadi (2003)	2	14.5 et 21	0.256, 0.363 et 0.512	1100-4000	0.6, 0.3, 0.3
Mousavi (2011)	2	30 et 45	0.15, 0.27 et 0.36	7000-13000	0.3, 0.6, 0.7
Nazemi (2011)	2	50 et 120	0.425, 0.6 et 0.85	2000-20000	0.78, 0.6, 0.58

Le nombre total des expériences utilisées est de 90, toutes à surface libre et ayant un nombre de Reynolds de l'ordre de 10^4, ce qui permet de dire qu'il s'agit d'un écoulement turbulent au regard du chapitre précédent. Pour définir une relation de calcul du gradient hydraulique critique dans ces conditions, des modifications ont été apportées à la relation de Sakthivadivel (1969) pour s'adapter aux écoulements turbulents. Jafar Chapokpour et Ebrahim Amiri Tokaldany (2012) introduisent donc la formule suivante :

$$i_c = 10335\,\lambda_1^{1.33}\,\lambda_2^{-2.97}\left[(G_S - 1)\,g\,d_S\,(\cos\theta\,\tan g\phi - \sin\theta)\right]^{-0.86} \qquad (49)$$

Avec λ_1 et λ_2 deux paramètres géométriques adimensionnels.

Ils ont tracé par la suite la courbe comparant les résultats expérimentaux aux résultats théoriques.

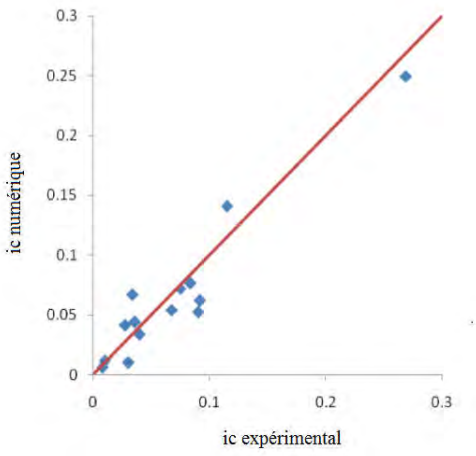


Figure II.1.1 : graphique comparant les résultats expérimentaux et numériques de gradient hydraulique critique (Jafar Chapokpour et Ebrahim Amiri Tokaldany (2012))

Dans leur recherche, Jafar Chapokpour et Ebrahim Amiri Tokaldany (2012) voulaient se concentrer sur les caractéristiques géométriques de l'enrochement au lieu de celles de l'écoulement, et ils ont démontré que leur relation définie (eq 48) donne de bons résultats.

II.1.3.4 L'étude de Mousavi, Ammiri-Tokaldany et Davoudi (2011)

Les barrages en terre sont des ouvrages constitués pour la protection des rivières contre l'érosion et pour stabiliser les bords des rivières. Ceci est réalisé en maintenant la perméabilité du barrage telle que le passage à la fois de l'eau et des sédiments soit possible sans qu'il n'y ait colmatage des pores. De ce fait, il est nécessaire de maintenir le gradient hydraulique supérieur au gradient hydraulique critique à partir duquel il y a un transport des particules des sédiments. Dans l'étude de, Mousavi et al. (2011), une nouvelle relation a été testée en se référant à la relation de Sakthivadivel (1969) et en se basant sur des résultats expérimentaux réalisés dans un canal expérimental.

Dans cette étude, toutes les expériences ont été faites dans un canal rectangulaire de longueur 15 m, de largeur 0.6 m et de hauteur 0.6 m. Le modèle du barrage consiste en des enrochements ayant un diamètre bien déterminé. Les enrochements ont été remplis dans un panier en grillage dont la longueur est de 0.3 m, la largeur et la hauteur sont de 0.6 m. puis au début de chaque expérience ils injectent du sable à l'entrée des enrochements. Au cours de ces expériences, ils ont utilisé deux tailles différentes de granulats et trois types de sable. En effet, les granulats ont un diamètre moyen de 3cm et un diamètre moyen de 4.5 cm. Les diamètres de sables utilisés sont 0.15, 0.27 et 0.36 mm. Le dispositif expérimental est présenté ci-après.

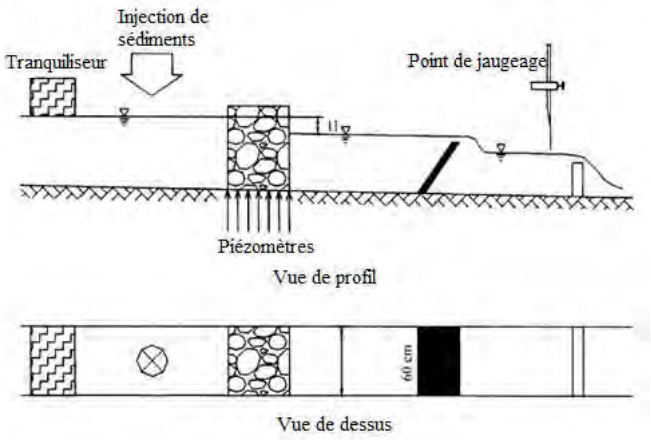


Figure II.1.2 : schéma du canal expérimental utilisé pour les expériences de Mousavi et *al.* (2011)

- Résultat de l'étude

A partir de leurs résultats ils ont défini une relation en puissance de calcul de gradient hydraulique critique exprimée par :

$$i_c = 22.139(G_s - 1)gd_s(\cos\theta \tan g\phi - \sin\theta)^{1.066} \quad (50)$$

Avec : G_s : densité relative des particules de sédiments, d_S : diamètre des sédiments, θ : la pente du canal et ϕ : l'angle de dépôt des sédiments et g est l'accélération de pesanteur.

Pour valider cette relation, ils ont utilisé les résultats des douze expériences. Mousavi et al. (2011) ont trouvé une bonne concordance entre le gradient hydraulique calculé par l'eq 50 et celui déterminé expérimentalement.

II.1.3.5 L'étude de Benyamin Naghavi et Mahmoud Maghrebi (2011)

Les ouvrages d'accueil de fond peuvent être utilisés pour détourner le cours d'une rivière montagneuse escarpée. Dans l'étude de Naghavi et Maghrebi (2011), un modèle expérimental d'un nouveau système de cet ouvrage, constitué d'un milieu poreux, a été conçu pour simuler les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement dévié. Au cours de cette étude, un grand nombre d'expériences a été réalisé dans différentes conditions hydrodynamiques impliquant un certain nombre de variables à savoir, le débit, la pente du canal, le type de granulats utilisé, et des sédiments en tant que matériau de colmatage.

Le dispositif expérimental utilisé pour la simulation de la déviation de l'écoulement à travers un milieu poreux est représenté sur la figure ci-après. L'installation est composée d'un canal de 10 m de longueur, 0.3 m de largeur et 0.5 m de profondeur, dans lequel une boîte rectangulaire galvanisé de 20cm de longueur, 30cm de largeur, 10 cm de hauteur, était rempli de matériaux granulaires grossiers. La boîte a été fixée à une distance de 5 m à partir de l'amont du canal. A l'aval immédiat de la boîte, le canal a été divisé en deux étages. Le rôle du canal inférieur était de transmettre la décharge détourné Q_d, et le rôle du canal supérieur était de transmettre la décharge restée Q_r. Un déversoir rectangulaire a été fixé à la fin du canal supérieur afin de mesurer Q_r. Les rejets détournés et restés ont été recueillis dans un réservoir situé au-dessous du canal d'amenée et pompés vers la chambre de tranquillisation qui est située à l'amont de la section d'entrée. Le débit total Q_t a été mesuré par un compteur à orifice situé immédiatement en aval de la pompe et une double vérification a été réalisée en utilisant un déversoir rectangulaire à l'extrémité de la chambre de tranquillisation. Ensuite, le débit

dérivé a été calculé sur la base du fait que les rejets détournés et restés étaient égaux à la décharge totale. Dans cette étude, trois pentes de 0, 10, et 20% ont été utilisées.

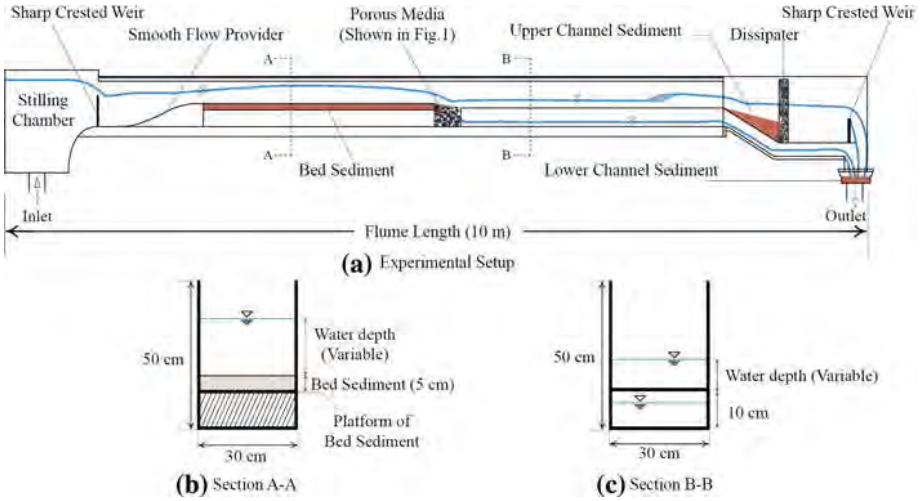


Figure II.1.3 : a, une section longitudinale du dispositif expérimental, b est la section transversale du canal a l'amont du milieu poreux et c en aval des milieux poreux

II.1.3.5.1 Protocole expérimental

Toute les 30 minutes de chaque essai, la variation temporelle de la décharge détourné Q_d, de la hauteur d'eau dans les deux canaux (supérieur et inférieur), et la masse de sédiments colmatés dans les milieux poreux ont été mesurées.

Les différents types de matériaux utilisés sont présentés dans les tableaux ci-dessous

Tableau II.1.2 : caractéristique des milieux utilisés

Table 1 caractéristiques de taille de gravier

type de gravier	D_{15}(mm)	D_{50}(mm)	D_{85}(mm)
P1	7.8	8.6	9.8
P2	10.2	11.4	12.6
P3	13.4	14.6	15.8

Table 2 caractéristiques de taille de sédiment

type de sédiment	d_{15}(mm)	d_{50}(mm)	d_{85}(mm)
S1	1.15	1.45	1.7
S2	1.4	2.1	2.5
S3	2.45	2.7	3.1
S4	1.31	1.85	3.0

Table 3 rapport de taille de grains , R_s

type de sédiment	type de gravier		
	P1	P2	P3
S1	4.64	6.04	8.07
S2	3.05	3.96	5.3
S3	2.50	3.25	4.34
S4	2.60	3.38	4.52

II.1.3.5.2 Résultats et conclusions

L'objectif de cette recherche est d'étudier l'évolution de la conductivité hydraulique du milieu poreux en fonction du colmatage. Elle a été déterminée par la relation suivante :

$$K = \frac{2\,g\,\Delta h}{\nu}\, r\,Ct \qquad (51)$$

Avec : r Ct présente la résistance induite par un matériau de colmatage.

En conclusion, il a été démontré d'une part que la décharge détournée vers le milieu poreux par rapport à l'apport de la grille du bas est faible. Afin de détourner une quantité spécifique d'eau, une structure plus grande est nécessaire. La variation de décharge déviée est affectée par le type des sédiments présent dans le lit de la rivière et de la taille des grains du milieu poreux. Ils ont conclu que chaque fois que le milieu poreux atteint une phase stable de colmatage, la décharge détournée atteint asymptotiquement sa valeur finale. Les résultats

expérimentaux ont montré qu'à l'étape finale de colmatage une quantité approximative de 65% de réduction dans la décharge par rapport à l'écoulement de l'eau pure se produit.

II.1.3.6 L'étude de Nazemi *et al.* (2011)

Dans cette étude, Nazemi et al. (2011) ont cherché à déterminer l'initiation du mouvement des particules de sédiments à l'intérieur du barrage en enrochement en réalisant des expériences de laboratoire. Une série de tests de laboratoire, à plus grande échelle que les études précédentes ont été menées pour collecter des données expérimentales. Une analyse dimensionnelle a été effectuée, comprenant tous les paramètres hydrauliques et physiques efficaces, en particulier, les forces d'inertie de l'écoulement et les caractéristiques de l'enrochement. Au cours de cette étude, il y a eu développement d'une relation en puissance pour le calcul du gradient hydraulique critique comme la majorité des études qui précède.

II.1.3.6.1 Protocole et dispositif expérimental

Une série de tests de laboratoire a été effectué dans un canal en plexiglas de 60 cm de largeur, 60 cm de hauteur et 1100 cm de longueur dans lequel un panier rempli d'enrochement d'une longueur de 78 cm a été placé. La pente du lit du canal peut atteindre trois pentes de 1mm/m, 5mm/m et 10mm/m. Les essais ont été réalisés à des débits variant de 3,2 à 25,2 l/s, fournis par un système de recirculation de la pompe électromécanique. Un chargeur de sédiments à taux variable a été installé à l'amont au-dessus du canal, à côté de la face amont du panier. Les tests ont été effectués sur quatre types de particules ayant une taille moyenne de diamètre (d50) de 5 et 12 cm. La figure suivante présente le dispositif expérimental.



Figure II.1.4 : Le barrage en enrochement du laboratoire et l'alimentation en sédiments durant l'essai

II.1.3.6.2 Résultats et discussion

L'étude de Mousavi *et al*. a abouti à la définition de la relation suivante :

$$i_c = 600R^{-0.748}\lambda^{0.094}(G_s - 1)\, g\, d_s (\cos\theta \quad \tan g\phi \quad \sin\theta)^{1.066} \tag{52}$$

Avec : R et λ est paramètre géométrique adimensionnel, G_s : densité relative des particules de sédiments, d ou d_S : diamètre des sédiments, θ : la pente du canal et ϕ : l'angle de dépôt des sédiments et g est l'accélération de pesanteur.

Ils ont même réalisé une étude comparative en reprenant les corrélations précédentes ainsi que celle qu'ils ont déterminée. Ils ont tracé le graphe ci-après :

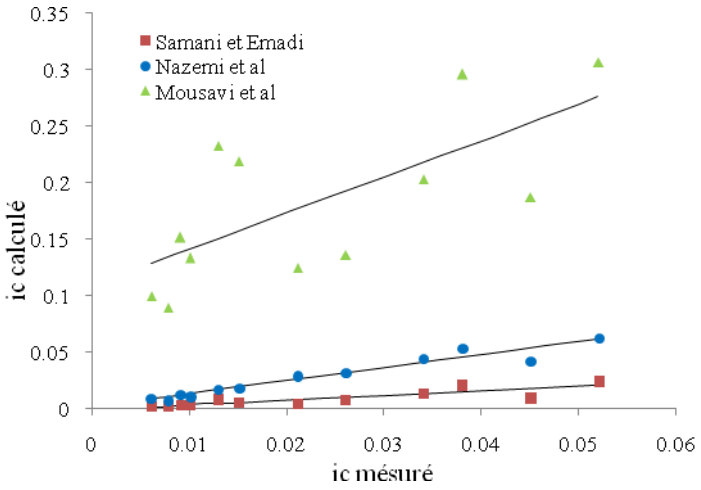


Figure II.1.5 : comparaison des différentes lois de calcul du gradient hydraulique critique ic

Etant donné que les conditions des essais et les caractéristiques sont proches du cas réel, ils ont estimé donc que la formule proposée peut être un guide pour les ingénieurs dans la conception des barrages en enrochement pour éviter le risque de colmatage des pores lors de crues chargées de sédiments.

II.1.3.7 L'étude de Mccorquodale et Hannoura (2011)

Dans leur étude, les chercheurs se sont basés sur les données de 1250 essais réalisés par différents chercheurs. L'objectif est de définir des équations adimensionnelles de calcul de la conductivité hydraulique des enrochements. Le milieu étudié est constitué des matériaux de diamètre variant entre 0.55 mm et 79 mm. L'effet de paroi a été pris en considération dans les

corrélations établies. Ils ont aussi tenu compte de la taille et de la distribution des particules, de la rugosité et de la porosité.

Dans leur étude, les auteurs ont utilisé la méthode de Ward (1964) (également Ahmed et Sunada (1969)) qui utilise la racine carrée de la perméabilité intrinsèque des granulats pour représenter la taille caractéristique des voies hydrauliques. Ils ont utilisé aussi la méthode de rayon hydraulique proposé par Ergun (1952) puis des modifications et des combinaisons des deux méthodes citées ont été réalisées.

Le nombre de Reynolds dans les pores Re_p, pour les données considérées, varie entre 10^{-3} à $20.\ 10^3$. Ces données ont été divisées en groupes de nombres de Reynolds élevés et faibles avec une limite entre les deux de $Re_p = 500$. Par la suite, ils ont proposé les équations suivantes pour décrire les écoulements 1D uniformes à travers les pierres concassées et les graviers des rivières :

Pour les faibles nombres de Reynolds dans les pores :

$$\frac{i\, g\, m\, d^2}{\nu\, q} = 4.6 + 0.79\,\frac{d\, q\, m^{1/2}}{\nu} \tag{53}$$

Pour les nombres de Reynolds dans les pores élevés :

$$\frac{i\, g\, m\, d'^2}{\nu\, q} = 70 + 0.54\left(0.5 + 0.5\,\frac{f_\varepsilon}{f_0}\right)\frac{d'\, q\, m^{1/2}}{\nu} \tag{54}$$

Avec : i est le gradient hydraulique, g est l'accélération de pesanteur, m est la porosité, d est le rayon hydraulique dans les pores, q est la vitesse moyenne et ν est la viscosité dynamique.

L'idée est bien ici de déterminer un gradient hydraulique en fonction des conditions de l'étude. Basé sur ces expériences nombreuses, l'interprétation en a été faite, ce qui a permis de donner un sens à ces corrélations.

II.1.4 Conclusion

Le chapitre de l'étude bibliographique permet de mieux se positionner par rapport à la problématique étudiée et avoir une idée sur les méthodes utilisées pour ce type des études dans la littérature. Malheureusement, notre cas d'étude (écoulements pleinement turbulents

dans les milieux macroporeux) n'est pas répandu dans la littérature ; beaucoup de chercheurs se sont intéressés à l'étude des écoulements turbulents dans les milieux poreux mais une minorité d'entre eux a étudié ce phénomène dans des milieux très perméables.

II.2 Chapitre2

Moyens de mesure mis en œuvre pour l'étude du transport de particules.

II.2.1 Introduction

Afin d'étudier le transport de particules au sein de nos mèches, il est nécessaire d'utiliser de ressources de mesure. Dans la suite, il est choisi de décrire succinctement celle que nous avons mise en œuvre.

II.2.2 Les moyens de mesure pour les expériences du transport solide

Afin de récupérer le sable, il est nécessaire de filtrer l'eau en sortie. Plusieurs possibilités s'offraient à nous mais il a été choisi une solution rationnelle et simple de mise en œuvre. Un géotextile a été utilisé comme piège à sédiment pour récupérer le sable sortant du milieu poreux à l'aval de l'écoulement. La taille extrêmement fine des mailles du géotextile lui permet de bloquer une très grande quantité de corps solides. Le terme "maille" n'est pas forcément approprié car certains géotextiles sont tissés quand certains autres ne le sont pas. Recherchant une bonne qualité de filtration, nous avons choisi un géotextile tissé de 150g/m², relativement robuste et simple à trouver pour récupérer en sortie les particules présentes dans l'écoulement. C'est en priorité cette qualité de filtration qui fait du feutre géotextile un matériau incontournable pour le drainage.

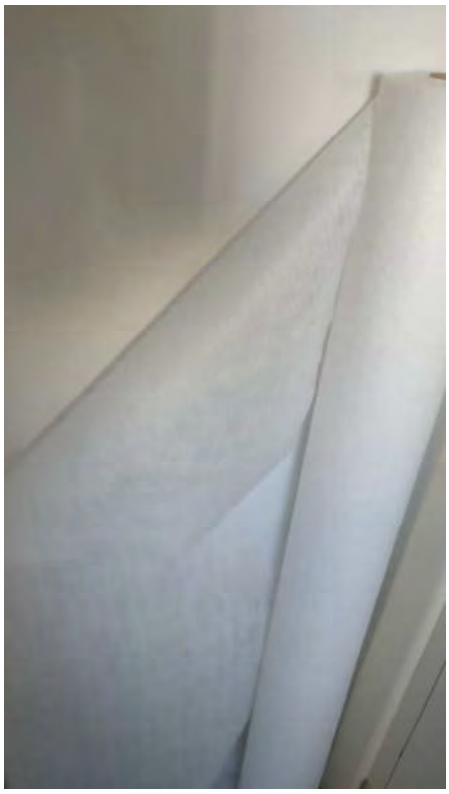


Figure II.2.1 : photo du géotextile de 150g/m² utilisé

Dans un deuxième temps, nous devions pouvoir peser le sable injecté et récupéré.

Durant les expériences du transport solide, et suite à l'injection du sable, on a réalisé des prélèvements de l'écoulement à des intervalles de temps définis préalablement. Nous collectons les échantillons dans des bouteilles.

Après prélèvement des échantillons, on a mesuré à la fois la turbidité mais aussi le taux en matière en suspension.

Pour la mesure de la turbidité en a utilisé un turbidimètre (fig. II.2.4)



Figure II.2.2 : photo d'un turbidimètre

La mesure de la turbidité n'est que la mesure du degré de turbidité d'une suspension. Elle fait partie de la photométrie des milieux troubles. Elle est déterminée grâce à un système optique, en général un spectrophotomètre classique, qui mesure la diminution, due à l'absorbance, de l'intensité d'un rayon lumineux de longueur d'onde connue, traversant la suspension. La turbidimétrie est utilisée en complément à la néphélométrie qui se base plutôt sur la diminution de l'intensité par diffusion de la lumière.

Pour la mesure de la matière en suspension, on a utilisé des fibres de verre, une balance de précision à 0.01g près, un filtre Büchner, une fiole à filtration, une pompe à vide et une étuve pour le séchage des fibres après la filtration de la mes.

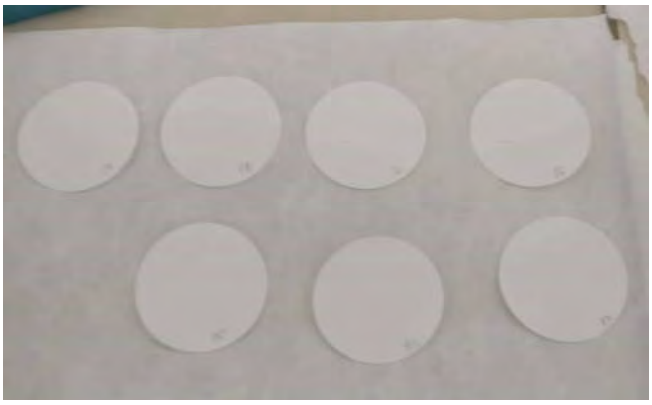


Figure II.2.3 : photo des filtres en verre utilisés



Figure II.2.4 : séchage des filtres avant utilisation

II.2.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté rapidement les matériels utilisés pour la réalisation des expériences de transport sédimentaire à l'INAT. Pour ces dernières, on peut dire qu'avec les moyens dont on dispose et la difficulté d'obtenir le matériel à temps et surtout le temps mis à chaque fois pour la maintenance du dispositif, on a pu réaliser des expériences qui n'ont pas été réalisés auparavant. Celles-ci doivent servir de base de données pour d'autres travaux de recherches dans ce domaine.

II.3 Chapitre 3

Approche expérimentale du transport de particules au sein de milieu représentatif de mèches.

II.3.1 Introduction

Dans ce chapitre on va s'attacher à décrire le protocole des expériences réalisées à l'INAT pour étudier le transport de particules solides au sein de nos mèches poreuses.

II.3.2 Expériences du transport solide dans le grand canal

Les expériences de transport solide sont plutôt des expériences qualitatives dont l'objectif est de décrire le phénomène de transport et de dépôt dans les milieux très perméables. Nos expériences ont été réalisées en utilisant des enrochements de diamètre moyen d= 15 cm.

II.3.2.1 Protocole des expériences

On a réalisé deux volets d'expériences. La première consistait à couvrir le bassin aval avec du géotextile dont on connait la masse à sec pour récupérer la quantité de sable à la sortie du milieu poreux à la fin de chaque expérience. Puis, pour un débit donné, et après la stabilisation de l'écoulement, on injecte une quantité de sable de 9kg à l'entrée du milieu poreux, tout en agitant jusqu'à la disparition totale du sable. A la fin de l'expérience et après séchage du géotextile, on pèse la masse de sable récupérée par mesure de la différence entre la masse du géotextile contenant le sable piégé et la masse du géotextile à sec. On détermine ainsi la quantité piégée de sable pour différents débits.

Pour chaque expérience, on considère la quantité de sable piégée lors de l'expérience qui la précède comme un état initial, et on injecte de nouveau une quantité de 9 kg à l'entrée du milieu poreux.



Figure II.3.1: Le sable utilisé dans les expériences du transport solide

Une analyse granulométrique a été réalisée sur le sable utilisé dans nos expériences. L'expérience consiste à faire passer un échantillon de sable dans une série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut

vers le bas du 0.5 au 0.08 mm comme présenté dans la figure suivante. Puis, suite au passage sur un agitateur pendant 10 mn, on pèse le refus de chaque tamis et on trace par la suite la courbe granulométrique.



(a) (b)

Figure II.3.2 : Dispositif de l'expérience de granulométrie pour le sable utilisé ; (a) : les tamis utilisés, (b) : photo de l'agitateur électrique

Le résultat de cet essai est présenté par la figure ci-après.

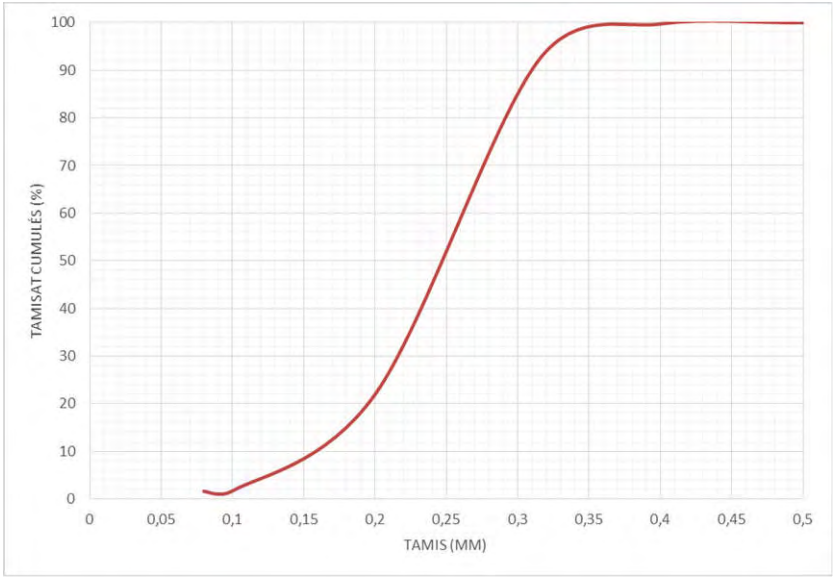


Figure II.3.3 : Courbe granulométrique du sable utilisé dans les expériences à l'INAT

La courbe granulométrique du sable blanc utilisé comme sédiment dans nos expériences du transport solide montre que le diamètre moyen D_{50} est de 0.25 mm.

Cette première série d'expériences est réalisée avec des débits 6, 10, 15, 20, et 26 l/s. La figure ci-dessous présente les résultats expérimentaux obtenus. Elle regroupe la courbe de la quantité injectée et celle piégée par le milieu poreux pour chaque débit, selon le protocole choisi.

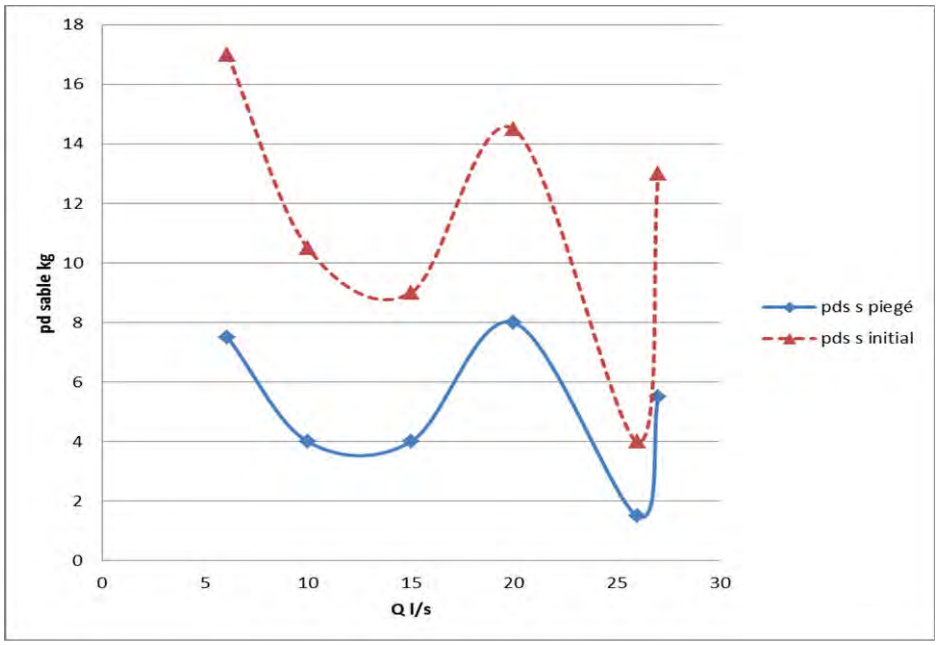


Figure II.3.4 : Variation du poids du sable piégé et sable injecté en fonction du débit

Ces courbes ont été tracées en tenant compte de la quantité de sable piégée durant l'expérience qui précède chaque autre expérience. On remarque que le milieu poreux répond d'une manière synchrone, en effet, la quantité de sable piégée augmente avec la quantité injectée et diminue avec l'augmentation de débit.

Le deuxième volet d'expériences consiste à étudier le même milieu poreux. Pour un débit donné, on verse une quantité de sable initiale de 6 kg à l'entrée du milieu poreux tout en agitant jusqu'à la disparition de toute la quantité versée. En même temps, on installe le géotextile à l'aval du canal et à la fin de l'expérience, on prélève la ligne d'eau correspondante pour des questions de précision pour le calcul de la vitesse et on mesure la

quantité de sable piégée par le géotextile pour une expérience de 4h depuis l'injection du sable.

On refait cette expérience tout en gardant le même débit mais à chaque fois, on augmente la quantité de sable injectée, et bien sûr on tient compte à chaque fois de l'état initial qui correspond à la quantité piégée durant l'expérience précédente.

Avec cette expérience, on peut déterminer la quantité de sable piégée par le milieu poreux pour un même débit donné. Dans notre cas, on a choisi de commencer par un débit de 10 l/s, et pour chaque expérience, on ajoute une quantité de 2 kg par rapport à l'expérience précédente. Au début de chaque expérience, on pèse le géotextile pour avoir le poids de ce dernier afin de pouvoir mesurer le poids du sable piégé.

A la fin de chaque expérience, on pèse aussi le poids du géotextile (bien sur après l'avoir séché) ce qui nous donne le poids du géotextile + sable. Par la suite on peut déterminer le poids du sable piégé dans le géotextile et celui dans le milieu poreux.

On a aussi suivi l'évolution de la turbidité au cours du temps. En fait, on a fait des prélèvements à l'amont et à l'aval de la mèche toutes les 10 mn.

Ci-après, on présente des résultats de quelques expériences réalisées.

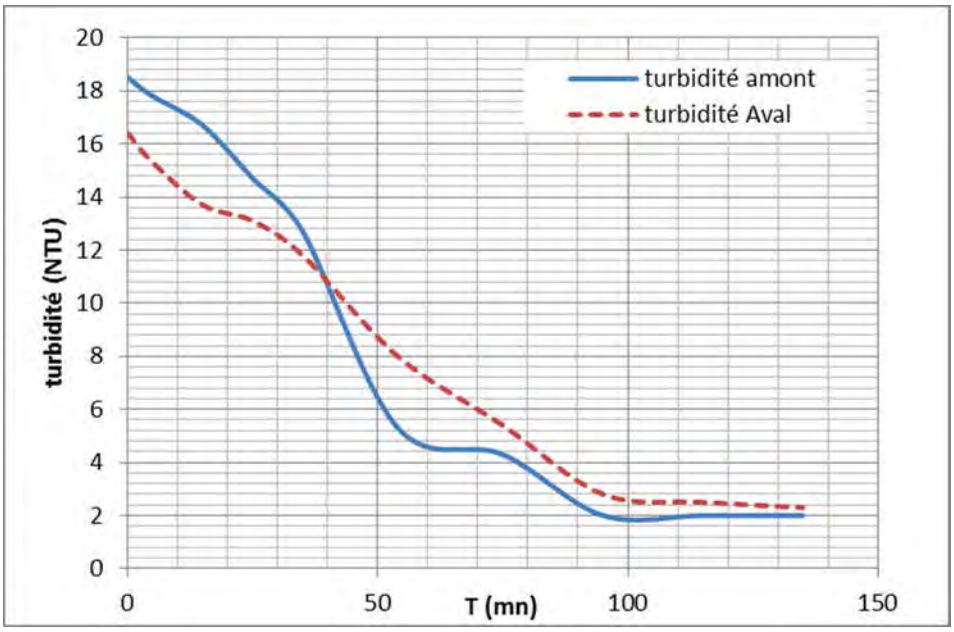


Figure II.3.5 : Evolution de la turbidité en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale du sable injecté de 4 kg

La figure montre une diminution des deux courbes au cours du temps. En revanche, on remarque que la turbidité à l'amont est plus importante au début de l'essai sur une période de 40 mn puis elle devient moins importante à l'aval. On remarque que les deux valeurs de turbidité à l'amont et à l'aval tendent vers une constante (et se stabilisent) à t= 170 mn.

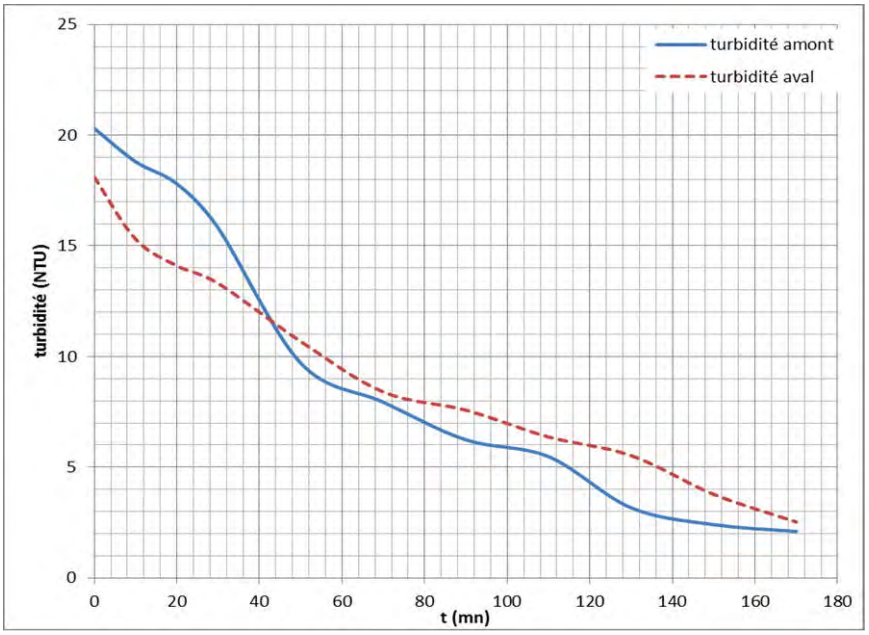


Figure II.3.6 : Evolution de la turbidité en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de 6 kg

Une diminution des deux courbes au cours du temps est observable, et on remarque que la turbidité à l'aval après t=40mn est plus importante que celle à l'amont. Pour cet essai on n'a pas pu atteindre la stabilisation des deux valeurs à l'amont et à l'aval puisque la quantité injectée est plus importante. Cela demandera plus du temps pour atteindre cette valeur. Mais on peut observer une tendance à la stabilité vers une valeur de turbidité de 2 NTU.

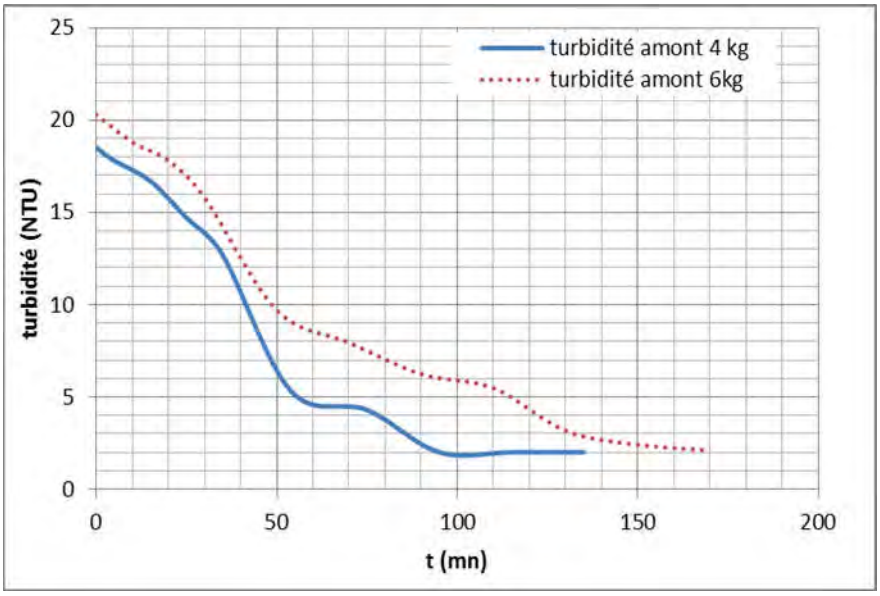


Figure II.3.7: Comparaison entre l'évolution de la turbidité en fonction du temps à l'amont pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 6 kg et 4 kg

La figure montre bien que la turbidité mesurée pour la quantité 6kg est nettement supérieure à celle mesurée pour la quantité 4kg, à l'amont du milieu poreux, ce qui est tout à fait logique. Une valeur constante de turbidité est obtenue et vaut de l'ordre de 2 NTU. Mais, la période nécessaire pour l'atteindre est proportionnelle à la quantité de sable injectée.

.

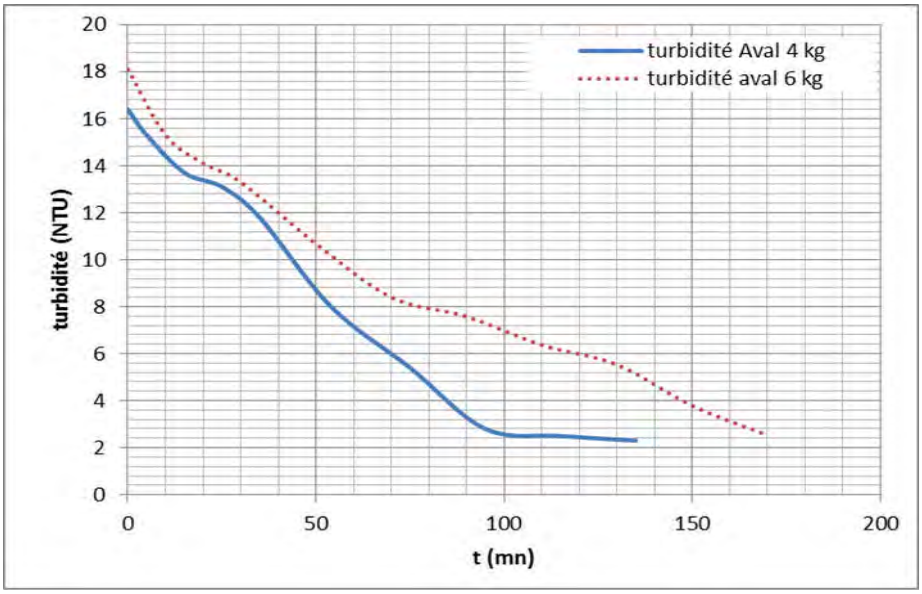


Figure II.3.8 : comparaison entre l'évolution de la turbidité en fonction du temps à l'aval pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 6 kg et 4 kg

Cette figure montre de même que la turbidité mesurée pour la quantité 6kg est aussi supérieure à celle mesurée pour la quantité 4kg, à l'aval de notre milieu poreux. Une valeur constante de turbidité est obtenue et vaut de l'ordre de 2 NTU. Mais, la période nécessaire pour l'atteindre est une fonction croissante de la quantité injectée.

Pour la première expérience réalisée avec une quantité de sable injectée de 4 kg, on a mesuré l'évolution de la matière en suspension MES au laboratoire pour comparer entre les deux méthodes de mesure.

Les mêmes expériences ont été réalisées pour des masses de sable injecté de 2 kg et 8 kg.

Les figures ci-après présentent les résultats obtenus.

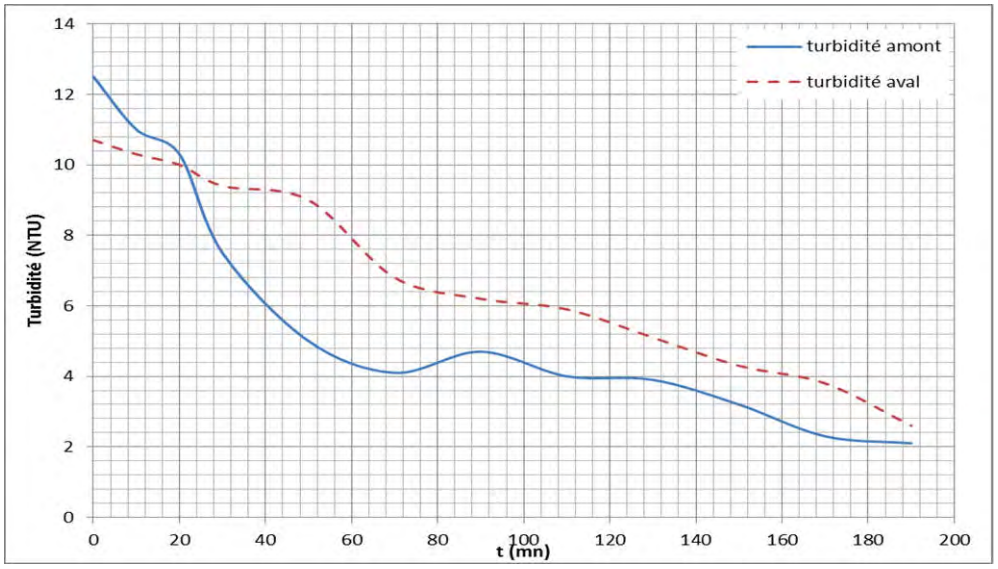


Figure II.3.9 : Evolution de la turbidité en du milieu poreux fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 2 kg

Le graphe montre que la turbidité à l'amont du milieu poreux pour cette expérience varie entre 12.5 et 2.1 NTU alors qu'elle varie entre 10.7 et 2.6 à l'aval de ce dernier. Elle diminue en fonction du temps. Au début de l'expérience la turbidité à l'amont est supérieure à celle de l'aval pendant les 21 premières minutes. Puis, il y a inversion et la turbidité à l'aval augmente par rapport à celle à l'amont jusqu'à la fin de l'expérience. On remarque aussi que la turbidité du milieu tend vers une constante qui est l'état de stabilité, dans ce cas elle est de 2 NTU.

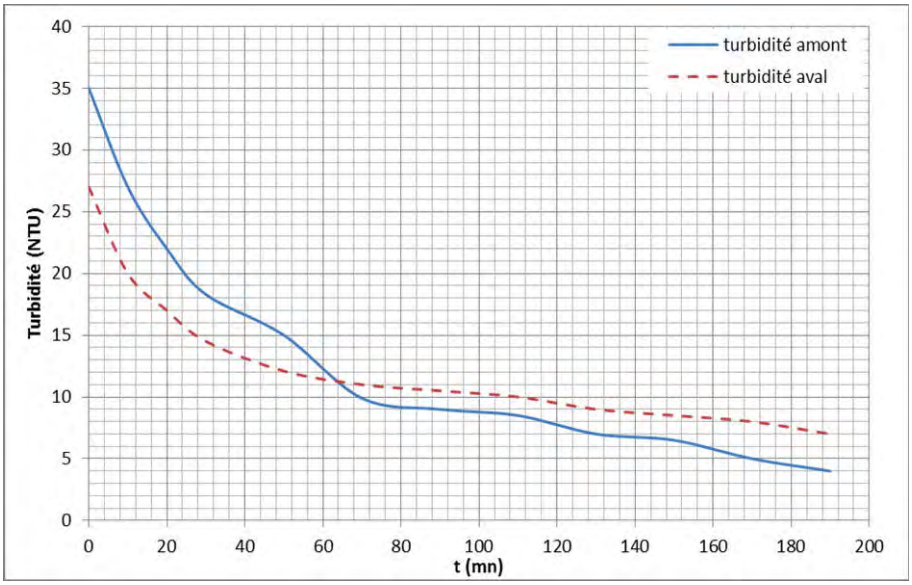


Figure II.3.10 : Evolution de la turbidité du milieu poreux en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité initiale de sable injecté de 8 kg

La figure ci-dessus montre que la turbidité à l'amont du milieu poreux pour cette expérience varie entre 35 et 4 NTU alors qu'elle varie entre 27 et 7 NTU à l'aval de ce dernier. Elle diminue au cours du temps. Au début de l'expérience, la turbidité à l'amont est supérieure à celle de l'aval jusqu'aux premières 62 minutes. Puis, la turbidité à l'aval augmente par rapport à celle à l'amont jusqu'à la fin de l'expérience. On remarque aussi que la turbidité du milieu tend vers une constante qui est l'état de stabilité. Par contre, pour cette expérience on n'a pas pu l'atteindre puisqu'en augmentant la masse injectée, la durée d'atteinte de cette constante augmente, et dans ce cas elle dépasse les 190 minutes.

Dans ce qui suit, on présente une comparaison entre les résultats des différentes expériences réalisées.

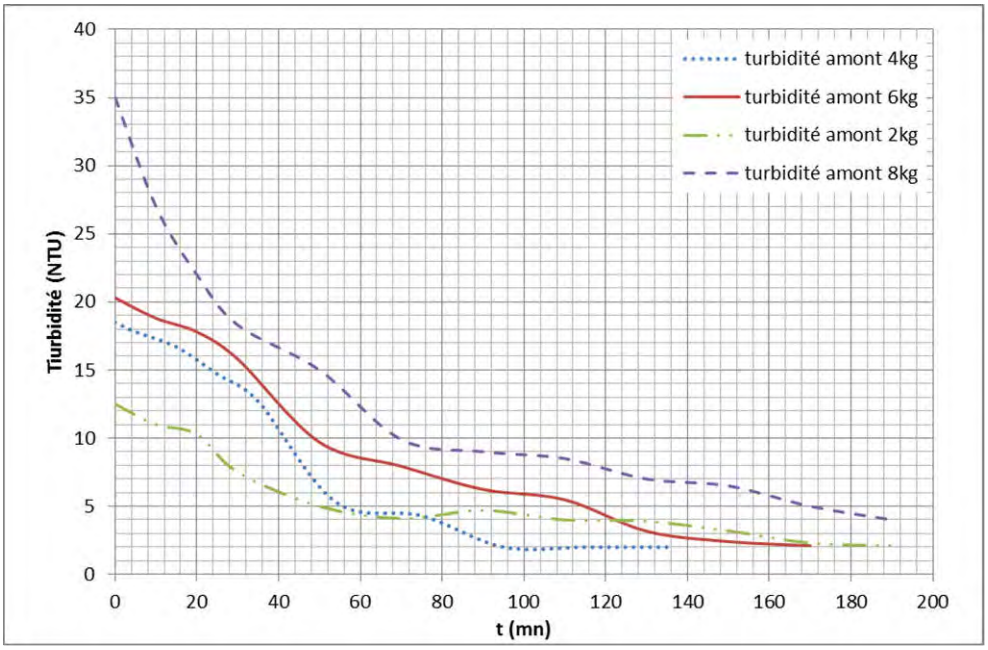


Figure II.3.11 : Comparaison entre les variations de la turbidité en fonction du temps à l'amont du milieu poreux pour un débit de 10 l/s et une quantité de sable injecté variable

La figure ci-dessus montre que la turbidité à l'amont du milieu poreux pour toutes les expériences diminue en fonction du temps. On remarque aussi que la turbidité du milieu à l'amont tend vers une constante (2 NTU) qui est l'état de stabilité, et qu'en augmentant la masse injectée la durée d'atteinte de cette constante augmente. En effet, avec une masse de 4 kg injectée, on l'obtient après 92 minutes, 156 minutes pour une masse de 6 kg et un temps supérieur à 190 minutes pour une masse de 8kg.

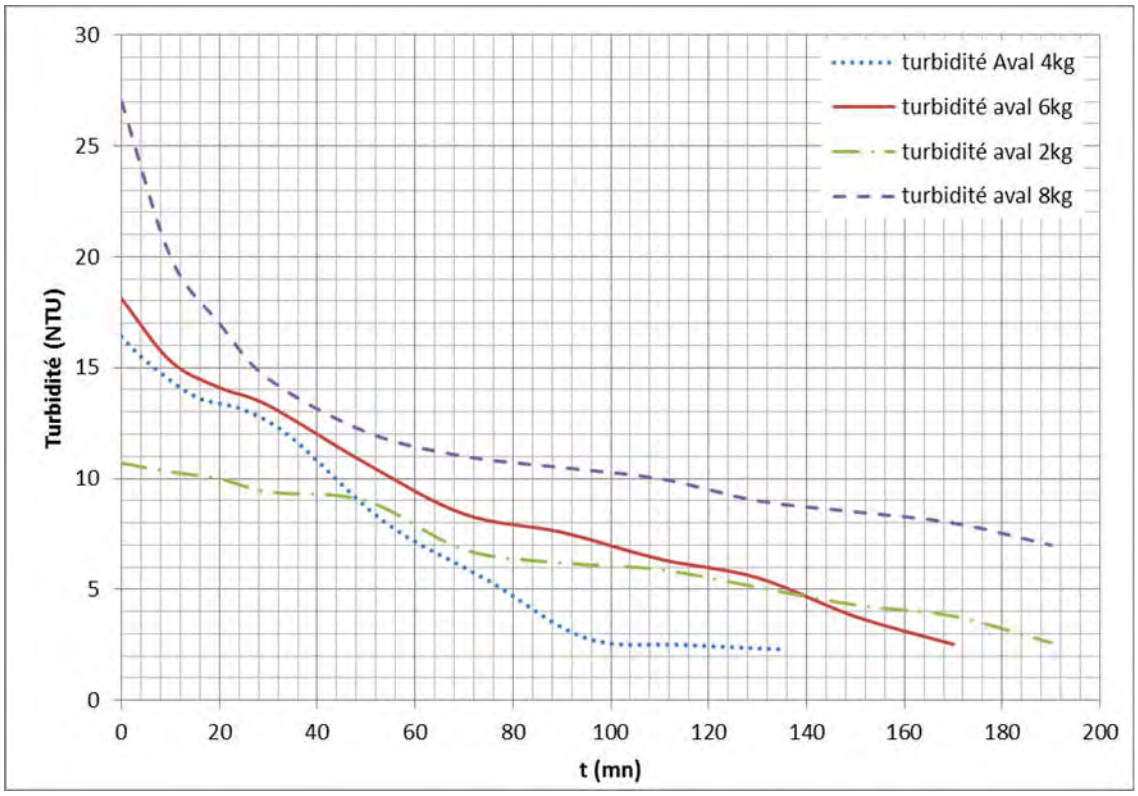


Figure II.3.12 : Comparaison entre les variations de la turbidité en fonction du temps à l'aval du milieu poreux pour un débit de 10 l/s et une quantité de sable injecté variable

La figure ci-dessus montre que la turbidité à l'aval du milieu poreux pour toutes les expériences diminue en fonction du temps. On remarque aussi que la turbidité du milieu à l'aval tend vers une constante qui est l'état de stabilité, et qu'en augmentant la masse injectée la durée d'atteinte de cette constante augmente. En effet avec une masse de 4 kg, il faut près de 100 minutes pour l'atteindre, alors que pour des masses de 6 kg et de 8kg, le temps est supérieur à 190 minutes.

Cela semble simplement dire que le milieu filtre le sable et le relargue vers l'aval avec un temps de retard, qui dépend des conditions expérimentales.

Afin de déterminer le temps de transport de sable à l'intérieur de la mèche, on a tracé les courbe log-log de la variation de la turbidité en fonction du temps de l'amont et de l'aval et on a obtenu les figures suivantes :

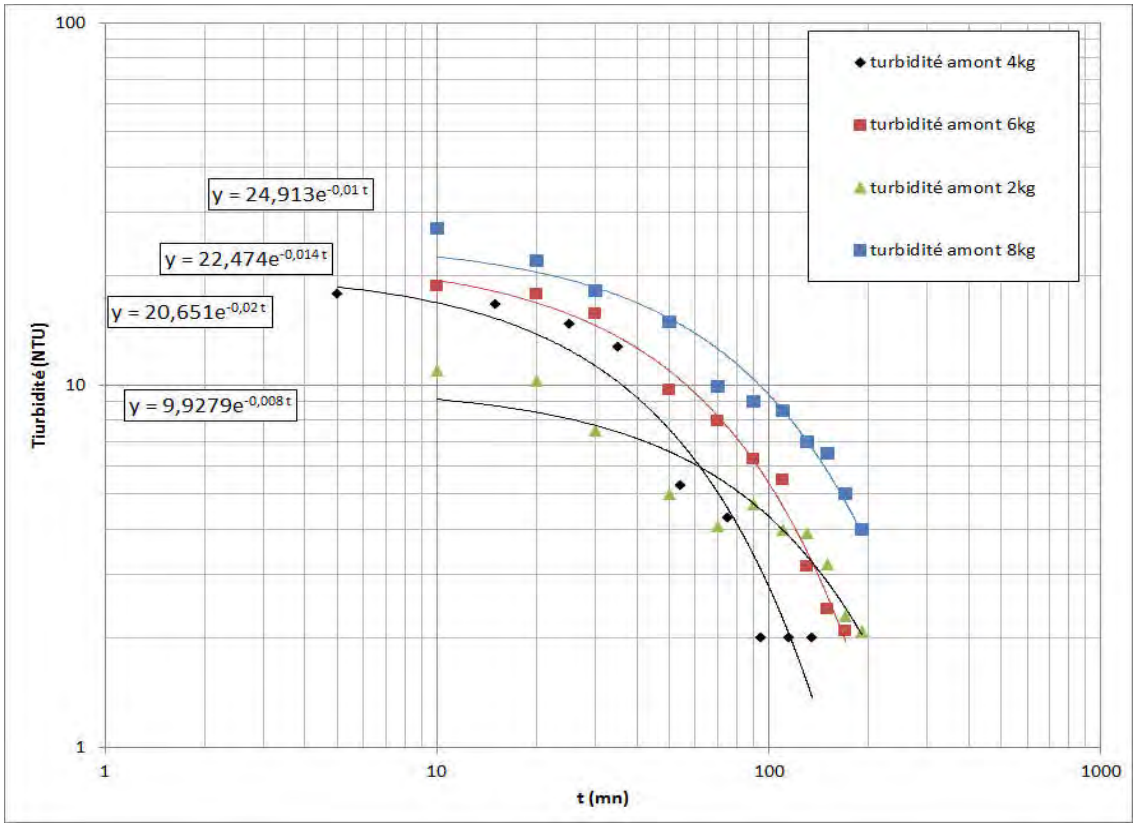


Figure II.3.13: Courbe log-log de la variation de la turbidité en fonction du temps à l'amont du milieu poreux pour un débit de 10 l/s

En traçant les graphes log-log, on a remarqué que pour chaque expérience il y a un temps caractéristique correspondant au temps d'entrainement des particules dans le milieu poreux.

On a aussi tracé les courbes de tendances entre la turbidité et le temps. Les équations de ces courbes permettent de déterminer l'expression de l'équation de calcul du temps caractéristique.

De meme, on a tracé les courbes log-log de la variation de turbidité en fonction du temps à l'aval de la mèche, et on a obtenu la figure suivante.

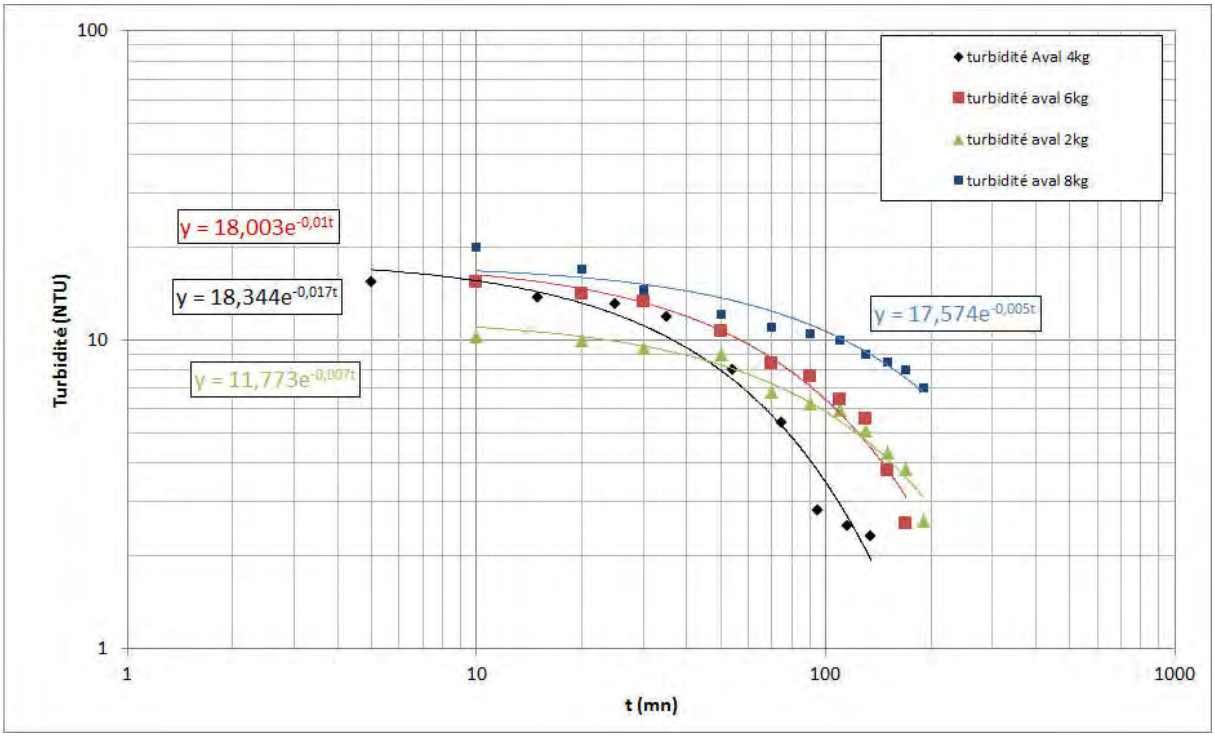


Figure II.3.14 : Courbe log-log de la variation de la turbidité en fonction du temps à l'amont du milieu poreux pour un débit de 10 l/s

Contrairement aux courbes log-log de l'amont, la figure II.3.14 montre qu'il n'y a qu'un seul temps caractéristique à l'aval de la mèche, ce temps correspond aussi au temps de transport des particules à l'intérieur de milieu poreux.

Afin de vérifier si le transport affecte la ligne d'eau, il est choisi de relever celle-ci et de la comparer aux mesures réalisées sans transport solide.

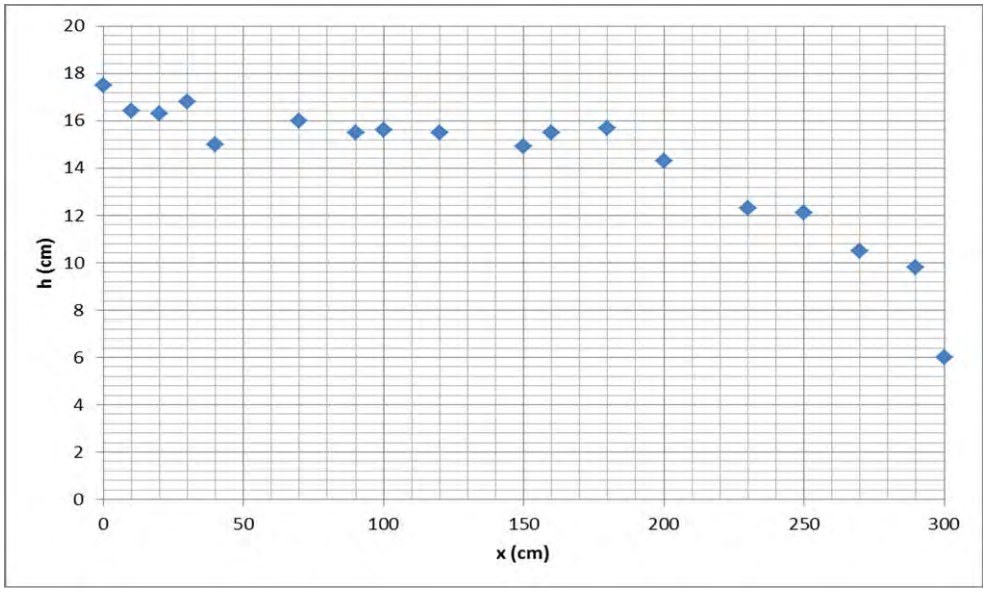


Figure II.3.15: La ligne d'eau obtenue avec le débit Q= 10 l/s

La figure II.3.15 présente la ligne d'eau obtenue expérimentalement avec le débit Q=10 l/s, elle montre que la hauteur d'eau à l'amont est de h= 17.5 cm et elle diminue graduellement jusqu'à une valeur de h=6cm à l'aval. Il est à noter que cette ligne d'eau n'a pas évolué au cours des expériences de transport solide. Elle est tout à fait conforme à celle présentée auparavant dans le chapitre I.3. On a obtenu la même ligne d'eau que celle des expériences réalisées avec l'eau propre.

Afin de vérifier que le milieu pouvait se décolmater, il a été choisi de réaliser une expérience complémentaire en augmentant fortement le débit après dépôt de sédiments dans la mèche.

Le protocole choisi fut le suivant. On augmente le débit brusquement à la fin d'une expérience préalable réalisée avec un débit de 10l/s. On observe alors s'il y a un changement de l'allure de la courbe de turbidité en fonction du temps à l'aval de la mèche. Les résultats sont donnés sur la courbe suivante.

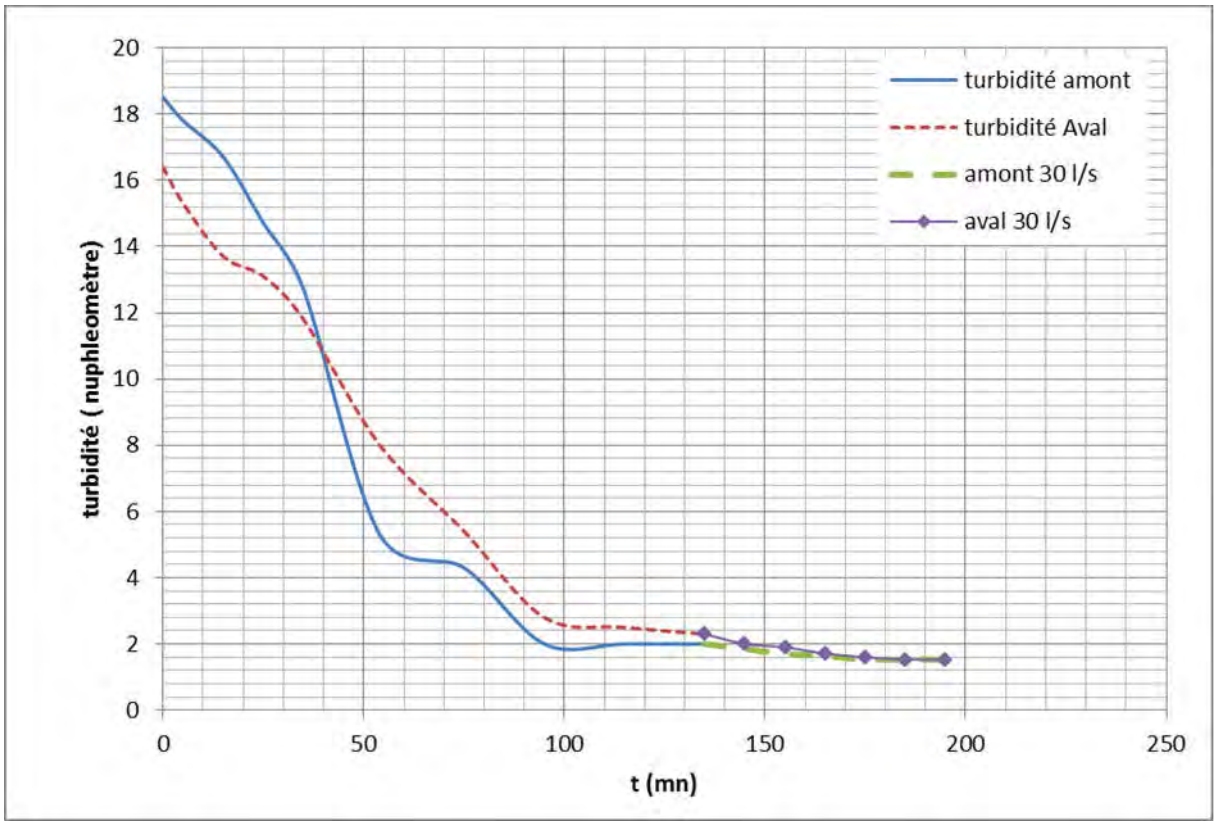


Figure II.3.16 : Comportement de la turbidité lors d'une expérience de nettoyage (passage brusque de 10 à 30l/s)

La figure II.3.16 montre qu'à la fin de l'expérience réalisée avec une quantité de sable injectée de 4 kg et après l'atteinte de l'état de stabilité marqué par une turbidité constante de 2 NTU à l'amont et à l'aval il y a eu une rechute de la turbidité suite à l'augmentation de débit. La turbidité tend alors vers une nouvelle valeur de stabilité caractéristique d'un débit de 30 l/s qui vaut 1.53 NTU. On remarque une différence majeure par rapport aux autres expériences : les deux courbes de turbidité à l'amont et à l'aval se confondent, ce qui peut être expliqué par un nettoyage total du milieu poreux. Cela confirme surtout que l'état stationnaire n'était pas atteint à la sortie des mèches lors des précédentes expériences, car une turbidité plus importante signifie bien la présence de particules dans l'écoulement. Augmenter le débit revient à forcer le transport de particules. Ceci a été confirmé par une expérience de bouchage provoqué de l'entrée du milieu poreux. L'expérience consiste à colmater 50 cm de l'amont de la mèche en injectant 79 kg de sable (figure II.3.17).



Figure II.3 17 : Photo de colmatage de l'entrée de milieu poreux (50cm) avec du sable blanc

Puis on a utilisé le débit Q=35 l/s pour observer le comportement du milieu vis-à-vis a un écoulement à grand débit. Pour cette expérience, on a effectué des prélèvements seulement à l'aval de la mèche pour mesurer par la suite la turbidité de ces échantillons. Les résultats sont présentés dans la figure suivante :

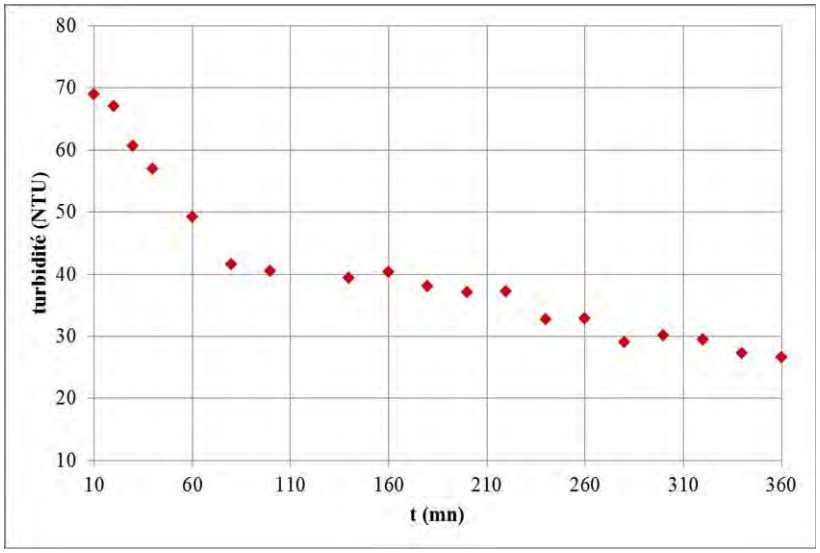


Figure II.3.18 : Variation de la turbidité en fonction du temps à l'aval du milieu poreux pour l'expérience de décolmatage avec un débit Q=35 l/s

D'après la figure II.3.18, On peut remarquer que le temps de début de mesure est à 10 mn. Le problème c'est que le turbidimètre ne mesurait pas les premiers prélèvements. On a remarqué qu'au premier contact avec l'eau, presque la totalité du sédiment colmatant les pores de la mèche a été transporté. Le graphe montre aussi que la turbidité a diminué rapidement de

70 NTU à t=10mn jusqu'à 40 NTU au bout de 1h :40. Puis la variation de la turbidité est devenue faible au cours du temps. Cette expérience a duré six heures mais l'état stationnaire n'est pas atteint à la sortie de la mèche.

II.3.2.2 Protocole de l'expérience de cinétique de dépôt de la matière en suspension et résultats

Parallèlement aux mesures de turbidité, nous avons aussi réalisé des dosages de la matière en suspension. Cela est basé sur une méthode par filtration sur filtre en fibre de verre. On commence par mettre les filtres dans une étuve pendant 1h à une température de 97°, puis on pèse le poids des filtres à sec. Après prélèvement des échantillons (un litre d'eau à l'amont et un litre d'eau à l'aval du milieu poreux toutes les 20 mn), on filtre ces derniers et on sèche les filtres dans l'étuve à 105° pendant une à deux heures. Enfin, on pèse de nouveau les filtres. Les photos ci-après montrent le dispositif utilisé pour la mesure de la MES.



Figure II.3.19 : Séchage des filtres avant utilisation



Figure II.3.20 : Photo du dispositif du filtrage

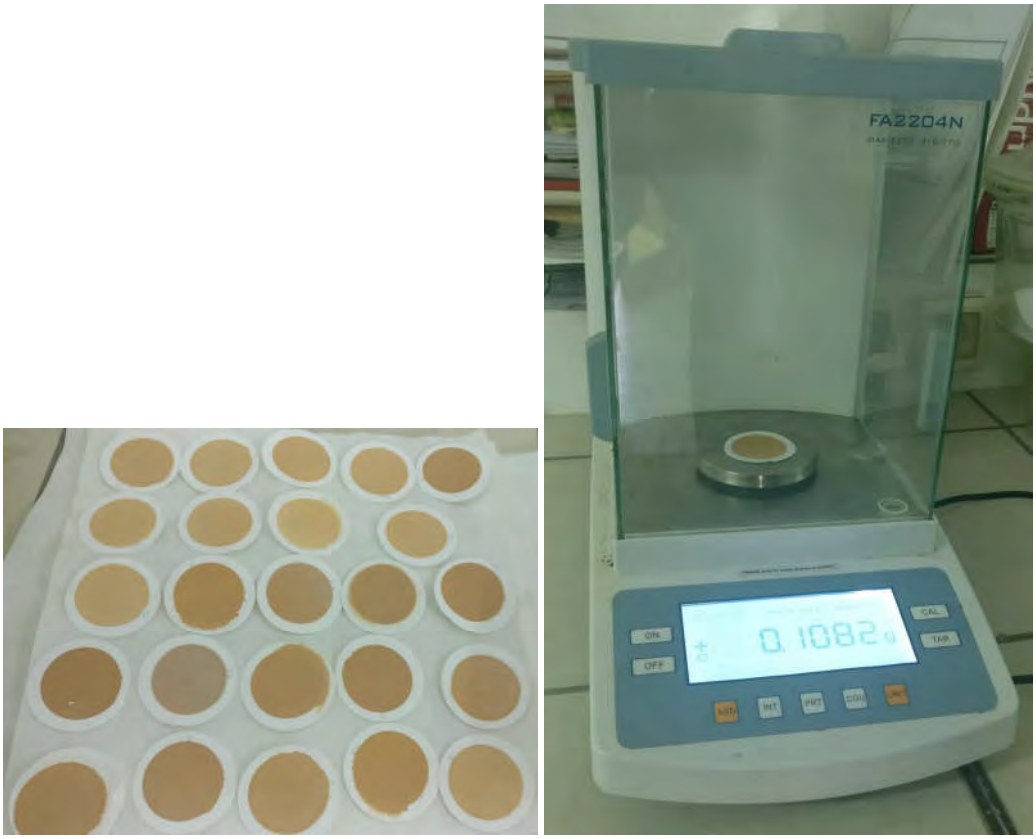


Figure II.3.21 : Mesure du poids des filtres après filtrage et séchage

La teneur en matière en suspension en g/l est exprimée par la relation suivante :

$$MES = 1000\left(\frac{M_b - M_a}{v}\right) \quad (54)$$

Avec :

M_b est la masse du filtre après filtration est séchage, en g ; M_a est la masse du filtre avant filtration en g ; v est le volume de l'échantillon en l.

On présente ci-après les résultats de calcul de la MES pour l'expérience réalisée avec un débit de 10 l/s et une quantité de sable injectée à l'amont de 6 kg.

Tableau II.3.1 **:** Résultats expérimentaux de la mesure de la matière en suspension

t (mn)	poids filtre sec Amont (g)	poids filtre Amont (g)	MES amont (g/l)	poids filtre sec Aval (g)	poids filtre Aval (g)	MES aval (g/l)
0	0,0987	0,2764	177,7	0,0961	0,1327	73,2
10	0,096	0,1161	20,1	0,0979	0,1192	21,3
20	0,0977	0,1105	12,8	0,0973	0,112	14,7
30	0,0984	0,108	9,6	0,0992	0,1111	11,9
50	0,0943	0,1003	6	0,0958	0,1039	8,1
70	0,0956	0,0976	2	0,0936	0,0995	5,9
90	0,0928	0,0936	0,8	0,0956	0,0996	4
110	0,1003	0,1026	2,3	0,0969	0,1008	3,9
130	0,0987	0,1011	2,4	0,0982	0,1016	3,4
150	0,0983	0,1015	3,2	0,1012	0,1056	4,4
170	0,1006	0,1021	1,5	0,0993	0,1026	3,3
190	0,101	0,1048	3,8	0,1028	0,106	3,2

On a traduit les résultats de ce tableau sur la figure suivante.

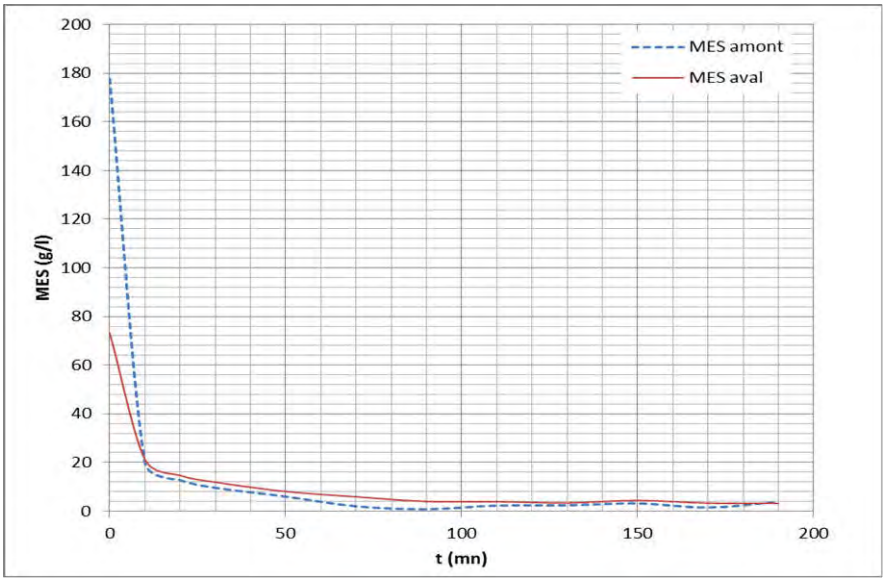


Figure II.3.22 : Variation de la matière en suspension en fonction du temps pour un débit de 10 l/s et une quantité de sable injecté de 6 kg

Cette figure présente la variation de la matière en suspension au cours du temps à l'amont et à l'aval du milieu poreux pour une masse injectée de sédiment en entrée de 6kg. La MES à l'amont varie entre 177 g/l et atteint une valeur de 4 g/l au bout de 190 minutes. Le taux de

MES varie de 72 g/l jusqu'à 4g/l au bout de 60 minutes à l'aval du milieu. On remarque donc que la valeur finale de la matière en suspension tend vers une constante qui est de 4 g/l présentant l'état d'équilibre et la stabilisation du système.

Pour notre cas la mesure de la MES est plus précise puisque malgré l'agitation de l'échantillon avant de mesurer la turbidité, le sable se décompte très vite.

2.3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les détails des expériences de transport sédimentaire réalisées dans le grand canal de l'INAT. Le sédiment utilisé est un sable blanc fin et le milieu poreux est constitué de cailloux de diamètre moyen d=15 cm. Pour l'interprétation des résultats de ces expériences, on a utilisé deux méthodes qui sont : la mesure de la matière en suspension, et la mesure de la turbidité. La première méthode a été appliquée seulement pour l'expérience où on a injecté une quantité de 2kg de sable à l'entrée de milieu poreux. Les deux méthodes ont montré qu'après l'injection de sédiments, la quantité de la matière en suspension récupérée à la sortie tend vers une valeur constante au cours du temps. Avec ce milieu et dans les conditions de nos expériences, on n'a pas observé un pourcentage de colmatage significatif. Ceci est à attribuer au régime d'écoulement car même avec un débit plus faible, *i.e.* Q= 6l/s, on est déjà dans le régime d'écoulement turbulent. Autre point, la pente du canal est de 5%, ce qui favorise le transport sédimentaire à travers la mèche.

Dans ces conditions, il n'y a pas de risque de colmatage du milieu, et donc impossibilité de voir une surélévation de la ligne d'eau. Pour étudier le colmatage dans ce milieu, il faudrait réaliser des expériences avec des débits plus faibles et en injectant des quantités plus importantes de sable à l'entrée du milieu poreux.

Conclusion générale et Perspectives

L'étude des écoulements dans des milieux macroporeux constitués d'enrochements est primordiale pour la compréhension de ce type d'écoulement. En effet, dans le cadre de la protection de l'environnement, on peut étudier les écoulements à travers les brises lames destinés pour la protection des littorales, aussi les écoulements à travers des murs de soutènement permettant de stabiliser les terrains meubles, ainsi qu'à travers tous types d'ouvrage en enrochement tels que les mèches enterrées objectifs de notre étude. Dans la majorité de ces cas, l'écoulement à travers les enrochements est accompagné de transport de sédiments. Ce phénomène est crucial en Tunisie, puisque le transport sédimentaire dans les oueds est toujours présent en particulier dans l'oued principal, l'oued Medjerda.

Pour étudier ces écoulements dans les enrochements, un canal expérimental de grandes dimensions et un perméamètre ont été conçus et construits à l'INAT en collaboration avec l'IMFT et Mecater. Ceci constitue un progrès pour la recherche en Tunisie, puisque des expérimentations de telle ampleur manquent.

En effet au cours de ce travail, on a réalisé plusieurs expériences dans le grand canal et dans le perméamètre de l'INAT, et aussi d'autres expériences dans les perméamètres de l'IMFT pour la première partie.

Pour les expériences à l'INAT, on a utilisé des cailloux de diamètre moyen 1 et 15 cm et pour les expériences à l'IMFT, on a utilisé des billes et des cailloux de diamètre moyen 1cm.

Ces expériences nous ont permis de mieux comprendre les interactions hydrodynamiques dans les milieux macroporeux dans le cas des écoulements inertiels et turbulents.

D'abord l'étude bibliographique sur ce type des écoulements a montré que toutes les relations de calcul de perte de charge dans les milieux poreux existantes sont des relations empiriques, basées sur des paramètres de calage déterminés en fonction de résultats expérimentaux.

On a testé les deux relations les plus utilisées dans la littérature ; celle de Forchheimer (1901) et celle d'Ergun (1952), et une troisième relation récente par rapport aux deux premières qui est celle de Barree et Conway (2004).

Certains chercheurs ont montré que la relation de Forchheimer présente des limites de validité pour les écoulements turbulents. Ceci est vrai si on utilise la perméabilité de Darcy dans le calcul de la perte de charge avec cette relation. Dukhan (20014) dans son étude a prouvé que la relation de Forchheimer (1901) est valable pour tous les régimes d'écoulement. La perméabilité utilisée dans la relation n'est pas celle de Darcy, mais c'est la perméabilité de Darcy divisée par un coefficient variable qui dépend du régime d'écoulement. Ceci a bien été vérifié lors de notre étude.

Entre ces trois relations, celle de Barree et Conway (2004) n'a pas donné les résultats attendus. Par contre, les deux autres relations donnent des résultats toujours très proches. Entre la relation de Forchheimer (1901) et celle d'Ergun (1952), il est préférable d'utiliser celle de Forchheimer puisqu'on peut calculer la perméabilité de Darcy par le modèle de Kozeny Carman (1937), et il ne reste par la suite qu'à déterminer le coefficient de Forchheimer en fonction des expériences. Par contre, dans la relation d'Ergun (1952) il y a les deux constantes A et B qu'on doit déterminer. L'optimisation peut alors s'avérer nécessaire et requiert d'avoir recours à l'expérimentation.

Pour la partie transport et dépôt des particules dans les milieux macroporeux, une étude expérimentale a été aussi réalisée avec les cailloux de diamètre moyen d= 15 cm dans le grand canal de l'INAT. C'est une étude quantitative dont l'objectif est de voir la réponse du milieu étudié à un écoulement d'eau chargée de sable. On a remarqué que le dépôt s'effectue surtout à l'entrée du milieu poreux et qu'une augmentation brusque de débit permet de provoquer un arrachage des particules déposées.

Les expériences réalisées au cours de cette thèse peuvent servir comme base de données pour d'autres études. En perspectives à cette étude, on peut proposer de faire d'autres expériences dans les perméamètres en utilisant les mêmes milieux étudiés, et en cas d'écoulement laminaire et pleinement turbulent afin de couvrir toutes les gammes de vitesse, pour mieux détecter les transitions entre les différents régimes d'écoulement.

Pour la partie transport sédimentaire, on propose de réaliser des expériences complémentaires avec une injection continue ou en pulse de sédiment. Ensuite pour des débits donnés on calculera le gradient hydraulique critique, et le temps nécessaire pour le nettoyage du milieu poreux.

References

[1] Ahmed, N; Sunada, D. K. (1969). Nonlinear flow in porous media. Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineering, HY 6: pp. 1847-1857.

[2] Antohe, B; Lage, J.L; Price, D.C; Weber, R.M. (1997). Experimental determination of the permeability and inertial coefficients of mechanically compressed aluminum metal layers. Journal of Fluids Engineering: 11: pp. 404-412.

[3] Barak, A. Z. (1987). Comments on 'High velocity Flow in Porous Media' by Hassanizadeh and Gray. Transport in Porous Media: 2: pp. 533-535.

[4] Baree, R. D; Conway, M. W. (2004). Beyond beta factors: A complete Model for Darcy, Forchheimer, and trans Forchheimer flow in porous media. SPE annual technical conference and exhibition held in Houston, Texas, U. S. A: pp. 1-8.

[5] Barree, R. D; Conway, M. W. (2005). Reply to Discussion of "Beyond Beta Factors: A Complete Model for Darcy, Forchheimer, and Trans-Forchheimer Flow in Porous Media." JPT: 57: 8: pp. 73-74.

[6] Barree, R. D; Conway, M. W. (2004). Beyond Beta Factors: A Complete Modelfor Darcy, Forchheimer, and Trans-Forchheimer Flow in Porous Media. PaperSPE 89325 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 26-29 September.

[7] Barrère, J. (1990). Modélisation des écoulements de Stokes et Navier-Stokes en milieu poreux. Bordeaux, France: Université de Bordeaux.

[8] Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. Dovers, New York, Chps. 2, 4, 5.

[9] Bear, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. New York City: Dover Publications, Inc.

[10] Beavers, G. S; Sparrow, E. M. (1969). Non-Darcy flow through fibrous porous media. Journal of Applied Mechanics: 36: pp. 711-714.

[11] Bennethum, L. S; Giorgi, T. (1997). Generalized Forchheimer equation for two-phase flow based on hybrid mixture theory. Transport in Porous Media: 26: 3: pp. 261-275.

[12] Benosman, G. (2012), Migration de particules fines dans un milieux poreux : Application. Thèse de doctorat. Ecole central de Paris.

[13] Bensoussan, J; Lions, L; Papanicolaou, G. (1978). Asymptotic analysis for periodic structures. North-Holland.

[14] Benyamin, N; Mahmoud, F; Maghrebi. (2011). Experimental Study of Sediment Flow Discharge in New System of Bottom Intakes with Porous Media. Transp Porous Med: 85: pp. 867–884.

[15] Bhattacharya, A; Calmidi, V. V; Mahajan, R. L. (2002). Thermophysical properties of high porosity metal foams. International Journal of Heat and Mass Transfer: 45: pp. 1017-1031.

[16] Bird, R. B; Stewart, W. E; Light foor, E. N. (2007). Transport Phenomena. 2nd Ed. John Wiley and Sons, Inc. New York, pp. 189-192.

[17] Bitao, L; Jennifer, L; Yu-shu, W. (2012). Non Darcy porous media flow according to the Baree and Conway model: laboratory and numerical modeling studies. SPE journal: pp. 70-79.

[18] Bonnet, J. P; Topin, F; Tadrist, L. (2008). Flow laws in metal foams: compressibility and pore size effect. Transp Porous Med: 73: pp. 233-254.

[19] Boomsma, K; Poulikakos, D. (2002). The effect of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics in metal foams. Journal of Fluids Engineering: 124: pp. 263-272.
[20] Boomsma, K; Poulikakos, D; Ventikos, Y. (2003). Simulation of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure. International Journal of Heat and Fluid Flow: 24: pp. 825-834.
[21] Blick, E. F. (1966). Capillary-orifice model for highspeed flow through porous media. Process Design and Development: 5: 1: pp. 90-94.
[22] Brunjail, D; Comiti, J. (1990). Mass transfer and energyaspects for forced flow through packed beds of long cylindrical particles. Chemical Engineering Journal: 45: 2: pp. 123-132.
[23] Carman, P. C. (1956). Flow of Gases Through Porous Media. London: Butterworths.
[24] Chauveteau, G; Thirriot, C. (1967). Régimes d'écoulement en milieu poreux et limite de la loi de Darcy. La Houille Blanche : 22 :1 : pp. 1-8.
[25] Chen, Z. X; Lyons, S. L; Qin, G. (2001). Derivation of the Forchheimer law via homogenization. Transport in Porous Media: 44: 2: pp. 325-335.
[26] Chapokpour, J; Tokaldany, E. A. (2012). Critical Hydraulic Gradient for Sediment Transport through Rockfill Structures. Iranica Journal of Energy & Environment: 3: 2: pp. 197-201.
[27] Chauveteau, G; Thirriot, C. L. (1967). Régimes d'écoulement en milieu poreux et limite à la loi de Darcy. La Houille Blanche. Vol 2, pp. 141–148.
[28] Chhabra, R. P; Comiti, J; Machac, I. (2001). Flow of non-Newtonian fluids in fixed and fluidised beds. Chem. Engng Sci: 56: 1: pp. 1-27.
[29] Comiti, J; Renaud, M. (1989). A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements: Application to beds packed with parallelepipedal particles. Chem. Eng. Sci: 44: 7: pp. 1539-1545.
[30] Comiti, J; Sabiri, N. E; Montillet, A. (2000). Experimental characterization of flow regimes in various porous media — III: limit of Darcy's or creeping flow regime for Newtonian and purely viscous non-Newtonian fluids. Chem. Engng Sci: 55: 15: pp. 3057-3061.
[31] Cooper, J; Wang, X; Mohanty, K. K. (1998). Non-Darcy Flow Experiments in Anisotropic Porous Media. Paper SPE 49224 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 27-30 September.
[32] Cyprien, S. (2012). Modélisation des écoulements dans les garnissages structurés : de l'échelle du pore à l'échelle de la colonne. Thèse de doctorat. Institut de mécanique de fluide de Toulouse, 178p.
[33] Darcy, H. (1856). Fontaines publiques de la ville de Dijon. Librairie des Corps Impériaux des Ponts et Chaussées et des Mines de Paris.
[34] De Plessis, J. P. (1994). Analytical quantification of coefficients in the Ergun equation for fluid friction in packed beds. Transport in Porous Media: 16: pp. 189-207.
[35] De Plessis, J. P; Masliyah, J. H. (1988). Mathematical modeling of flow through consolidated isotropic porous media. Transport in Porous Media: 3: pp. 145-161.
[36] Dietrich, B. (2012). Pressure drop correlation for ceramic and metal sponges. Chemical Engineering Science: 74: pp. 192-199.
[37] Dietrich, B; Schabel, W; Kind, M; Martin, H. (2009). Pressure drop measurements of ceramic sponges—Determining the hydraulic diameter. Chemical Engineering Science: 64: pp. 3633-3640.

[38] Dukhan, N. Editor. (2013). Metal Foam: Fundamentals and Applications. DESTech, Lancaster, PA, pp. xiv.
[39] Dukhan, N; Ali, M. (2012). On the Various Flow Regimes in Open-Cell Metal Foam. International Journal of Transport Phenomena. Vol 13, (2), pp. 85–97.
[40] Dukhan, N; Ali, M. (2012). Strong Wall and Transverse Size Effects on Pressure Drop of Flow through Open-Cell Metal Foam. International Journal of Thermal Science. Vol 57, pp. 85-91
[41] Dukhan, N; Minjeur II, C.A. (2011). A two-permeability approach for assessing flow properties in cellular metals. J. Porous Mat: 18: 4: pp. 417-424.
[42] Dukhan, N; Patel, K. (2011). Effect of sample's length on flow properties of open-cell metal foam and pressure-drop correlations. J. Porous Mat: 18: 6: pp. 655-665.
[43] Dukhan, N; Patel, P. (2008). Equivalent Particle Diameter and Length Scale for Pressure Drop in Porous Metals. Experimental Thermal and Fluid Science. Vol 32, pp. 1059-1067.
[44] Dupuit, J. (1863). Études Théoriques et Pratiques sur le Mouvement des Eaux. Paris: Dunod.
[45] Durlofsky, L. J. (1991). Numerical calculation of equivalent Grid block permeability tensors for heterogeneous porous media. Water resources research. Vol 27, (5), pp. 699-708.
[46] Dybbs, A; Edwards, R. V. (1984). A new look at porous media fluid mechanics – Darcy to turbulent, in Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media, J. Bear and M. Y. (Eds.) Corapciolu. Martinus Nijhoff Publishers, NATO ASI Series, Series E. The Hague.
[47] Edouard, D; Lacroix, A; Huu, C. P; Luck, F. (2008). Pressure drop modeling on solid foam: State of the art correlation. Chemical Engineering Journal: 144: pp. 299-311.
[48] Eisfeld, B; Schnitzlein, K. (2001). The influence of confining walls on the pressure drop in the packed beds. Chem. Engng Sci: 56: 14: pp. 4321-4329.
[49] Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress. Vol 48, (2), pp. 89–94.
[50] Ezeudembah, A. S; Dranchuk, P. M. (1982). Flow Mechanism of Forchheimer's Cubic Equation in High-Velocity Radial Gas Flow Through Porous Media. Paper SPE10979 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, NewOrleans, 26-29 September.
[51] Fand, R. M; Kim, B.Y.Y; Lam, A.C.C; Phan, R.T. (1987). Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres. J. Fluids Eng: 109: pp. 268-273.
[52] Figliola, R; Beasley, D. (2000). Theory and Design for Mechanical Measurements. John Wiley and Sons, New York, pp. 149-163.
[53] Firdaouss, M; Guermond, J. L; Le Quéré, P. (1997). Nonlinear corrections to Darcy's law at low Reynolds numbers. Journal of Fluid Mechanics. Vol 343, pp. 331–350.
[54] Forchheimer, P. (1930). Hydraulik. Leipzig/Berlin, Germany: Teubner.
[55] Forchheimer, P. (1901). Wasser Bewegung durch Boden. Z. Ver. Deutsch Ing. Vol 45, pp. 1782–1788.
[56] Fourar, M; Radilla, G; Lenormand, R; Moyne, C. (2004). On the non-linear behavior of a laminar single-phase flow through two and three-dimensional porous media. Advances in Water Resources: 27: 6: pp. 669-677.

[57] Fransico, J; Valdes-Parada, J; Alberto Ochoa-Tapia; Jose Alvarez-Ramirez. (2009). Validity of the permeability Carman–Kozeny equation: A volume averaging approach. Physica A: 388: pp. 789-798.
[58] Garrouch, A. A; Ali, L. (2001). Predicting the onset ofinertial effects in sandstone rocks. Transport in Porous Media: 44: 3: pp. 487-505.
[59] Geertsma, J. (1974). Estimating the Coefficient of Inertial Resistance in Fluid Flow Through Porous Media. SPEJ: 14: 5: pp. 445-450.
[60] Gibilaro, L. G; Di Felice, R; Waldram, S. P. (1985). Generalized friction factor and drag coefficient correlation for fluid particle interactions. Chemical Engineering Science. Vol 10, pp. 1817–1823.
[61] Giorgi, T. (1997). Derivation of the Forchheimer law via matched asymptotic expansions. Transport in Porous Media: 29: 2: pp. 191-206.
[62] Hall, M. J; Hiatt, J. P. (1996). Measurements of pore scale flows within and exiting ceramic foams. Exp. Fluids: 20: 6: pp. 433-440.
[63] Hamaguchi, K; Takahashi, S; Miyabe, H. (1983). Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. 49(445B):1991 [in Japanese].
[64] Happel, J; Brenner, H. (1983). Low Reynolds Number Hydrodynamics, Martinus Nijhoff Publishers, the Hague, pp. 395.
[65] Hassanizadeh, S. M; Gray, W. G. (1987). High velocity flow in porous media. Transport in Porous Media: 2: 6: pp. 521-531.
[66] Holditch, S. A; Morse, R. A. (1976). The Effects of Non-Darcy Flow on the Behavior of Hydraulically Fractured Gas Wells. JPT: 28: 10: pp. 1169-1179.
[67] Huyakorn P.S; Anderson P.F; Mercer J.W; White Jr H.O. (1987). Saltwater intrusion in aquifers: development and testing of a three-dimensional finite element model. Water Resour Res. Vol 23, pp. 293–312.
[68] Hwang, J.J; Hwang, G.J; Yeh, R.H; Chao, C.H. (2002). Measurement of interstitial convective heat transfer and frictional drag for flow across metal foams. J. Heat Trans: 124: pp. 120-129.
[69] Inayat, A; Freund, H; Schwab, A; Zeiser, T; Schwieger, W. (2011b). Predicting the specific surface area and pressure drop of reticulated ceramic foams used as catalyst support. Advanced Engineering Materials: 13: 11: pp. 990-995.
[70] Inayat, A; Schwerdtfeger, J; Freund, H; Korner, C; Singer, R. F; Schwieger, W. (2011a). Periodic open-cell foams: Pressure drop measurements and modeling of an ideal terakaidecahedra packing. Chemical Engineering Science: 66: pp. 2758-2763.
[71] Irmay, S. (1964). Theoretical models of flow through porous media. R.I.L.E.M. Symposium on the Transfer of Water in Porous Media. Paris.
[72] Irmay, S. (1958). On the theoretical derivation of Darcy and Forchheimer formulas. Trans., American Geophysical Union: 89: 4: pp. 702-707.
[73] Jin, Y; Uth, M. F; Kuznetsov, A.V; Herwig, H. (2015). Numerical investigation of the possibility of macroscopic turbulence in porous media: a direct numerical simulation study. Journal of Fluid Mechanics. Vol 766, pp. 76–103.
[74] Jolls, K. R; Hanratty, T. J. (1966). Transition to turbulence for flow through a dumped bed of spheres. Chem. Engng Sci: 21: 2: pp. 1185-1190.
[75] Jouini, M; Soualmia, A; Debenest, G; Dartus, D. (2016). Etude des écoulements turbulents dans des milieux très perméables. The International Conference & Exhibition on Advanced Geospatial Science & Technology (TeanGeo), Tunis, Tunisie.

[76] Jouini, M; Soualmia, A; Debenest, G; Masbernat, L. (2016). Study of turbulent flow through large porous media. 4th IAHR Europe Congress at the University of Liege. Belgium.
[77] Jouini, M; Soualmia, A; Saad, K; Masbernat, L; Dartus, D. (2013). Modélisation des écoulements dans une méche en pièrres en canal. 3ème Conférence Internationale sur l'Eau (CI.EAU), Alger, Algeria.
[78] Jouini, M; Soualmia, A; Saad, K. (2013). Etude des écoulements dans une mèche en pierre. 11ème Congrès de mécaniques,Agadir, Maroc,
[79] Joseph, D. D; Nield, D. A; Papanicolaou, G. (1982). Nonlinear equation governing flow in a saturated porous medium. Water Resour. Res: 18: pp. 1049-1052.
[80] Kaviany, M. (1998). Flow in porous media. In The Handbook of Fluid Dynamics, ed. R.W. Johnson, Chapter 21. Boca Raton, Florida: CRC PressLLC.
[81] Kaviany, M. (1995). Principles of Heat Transfer in Porous Media. 2nd Ed. Springer, New York, Ch. 2, pp. 3.
[82] Kececioglu, I; Jiang, Y. (1987). Flow through porous media of packed spheres saturated with water. ASME Journal of Fluids Engineering: 116: pp. 164-170.
[83] Kim, S. Y; Paek, J. W; Kang, B. H. (2000). Flow and heat transfer correlations for porous fin in a plate-fin heat exchanger. Journal of Heat Transfer: 122: pp. 572-578
[84] Klumpp, M; Inayat, A; Schwerdtfeger, J; Koner, C; Singer, R. F; Freund, H; Scheieger, W. (2014). Periodic Open Cell Structures with Ideal Cubic Cell Geometry: Effect of Porosity and Cell Orientation on Pressure Drop. Chemical Engineering Journal: 242: pp. 364-378.
[85] Knupp, P. M ; Lage, J. L. (1995). Generalization of the Forchheimer-extended Darcy flow model to the tensor permeability case via avariational principle. J. Fluid Mech: 299: pp. 97-104.
[86] Kulkarni, P. P; Rashid, M; Kulenovic, R; Nayak, A. K. (2010). Experimental investigation of coolability behaviour of irregularly shaped particulate debris bed. Nuclear Engineering and Design. Vol 240, pp. 3067–3077.
[87] Kuwahara, F; Kameyama, Y; Yamashita, S; Nakayama, A. (1998). Numerical model of turbulent flow in porous media using a spatially periodic array. Journal of Porous Media. Vol 1, pp. 47–55.
[88] Lage, J. L. (1997). The fundamental theory of flow through permeable media from Darcy to turbulent. In Transport Phenomena in Porous Media, ed. D. B. Ingham and I. Pop. Oxford, U.K.: Elsevier Science.
[89] Lage, J. L; Antohe, B. V; Nield, D. A. (1997). Two types of nonlinear pressure-drop versus flow-rate relation observed for saturated porous media. J. of Fluid Engineering: 119: pp. 700-706.
[90] Lake, L. W; Srinivasan, S. (2004). Statistical scale-up of reservoir properties: concepts and applications. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol 44, pp. 27–39.
[91] Larkins, R. P; White, R. R; Jeffrey, D. W. (1961). Two-phase concurrent flow in packed beds. AIChE Journal. Vol 7, pp. 231–239.
[92] Lasseux, D; Abbasian, A. A; Ahmadi, A. (2011). On the stationar macroscopic inertial effects for one-phase flow in ordered and disordered porous media. Physics of Fluids. Institut américaine de physique. Vol 23, 19p.
[93] Lasseux, D; Ahmadi, A; Arani, A. (2008). Two-phase inertial flow in homogeneous porous media: A theoretical derivation of a macroscopic model. Transport in Porous Media. Vol 75, pp. 371–400.

[94] Lasseux, D; Quintard, M; Whitaker, S. (1996). Determination of permeability tensors for two-phase flow in homogeneous porous media: Theory. Transport in Porous Media. Vol 24, pp. 107–137.

[95] Latifi, M. A; Midoux, N; Stork, A. (1989). The use of micro-electrodes in the study of flow regimes in a packed bed reactor with single-phase liquid flow. Chem. Engng Sci: 44: 11: pp. 2501-2508.

[96] Latifi, M. A; Midoux, N; Storck, A; Gence, J. N. (1989). The use of micro-electrodes in the study of the flow regime in a packed bed reactor with single phase liquid Flow. Chemical Engineering Science. Vol 44, pp. 2501–2508.

[97] Li, D; Engler, T. D. (2001). Literature Review on Correlations of the Non-Darcy Coefficient. Paper SPE 70015 presented at the SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, 15-17 May.

[98] Liu, J. F; Wo, W. T; Chiu, W. C; Hsieh, W. H. (2006). Measurement and correlation of friction characteristic of flow through foam matrixes. Experimental Thermal and Fluid Science: 30: pp. 329-336.

[99] Liu, S; Masliyah, J. H. (1999). Non-linear flows in porous media. J. Non-Newtonian Fluid Mech: 86: 1-2: pp. 229-252.

[100] MacDonald, M. J; Chu, C. F; Guilloit, P. P; Ng, K. M. (1991). A generalized Blake-Kozeny equation for multisized spherical particles. AIChE Journal. Vol 37, (10), pp. 1583–1588.

[101] Machac, I; Cakl, J. (1991). Flow of a generalized Newtonian liquid througha fixed bed of particles in transition flow region. Proc., 18th National Conference SCHI'91. Štiavnické Bane, Slovakia.

[102] Mancin, S; Zilio, C; Cavallini, A; Rossetto, L. (2010). Pressure drop during air flow in aluminum foam. International Journal of Heat and Mass Transfer: 53: pp. 3121-3130.

[103] Mancin, S; Zilio, C; Diani, A. Rossetto, L. (2013). Air forced convection through metal foams: Experimental results and modeling. International Journal of Heat and Mass Transfer: 62: pp. 112-123.

[104] Martins, J. P; Milton-Tayler, D; Leung, H. K. (1990). The Effects of Non-Darcy Flow in Propped Hydraulic Fractures. Paper SPE 20709 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 23-26 September.

[105] Mauret, E; Renaud, M. (1997a). Transport phenomena inmulti-particle systems—I. Limits of applicability of capillary model in high voidage beds-application to fixed beds of fibers and fluidized beds of spheres. Chem. Engng Sci: 52: 11: pp. 1807-1817.

[106] Mauret, E; Renaud, M. (1997b). Transport phenomena inmulti-particle systems—II. Proposed new model based on flow around submerged objects for sphere and fiber beds-transition between capillary and particulate representations. Chem. Engng Sci: 52: 11: pp. 1819-1834.

[107] McDonald, I. F; El_sayed, M. S; Mow, K; Dullien, F. A. L. (1997). Flow through porous media—the Ergun equation revisited. Ind. Eng. Chem. Fundam: 18: 3: pp. 199-208.

[108] Mei, C. C; Auriault, J. L. (1991). The effect of the weak inertia on flow through a porous medium. J. Fluid Mech: 222: pp. 647-663.

[109] Mickley, H. S; Smith, K. A; Korchak, E. I. (1965). Fluid flow in packed beds. Chem. Engng Sci: 20: 3: pp. 237-246.

[110] Montillet, A. (2004). Flow through a finite packed bed of spheres: A note on the limit of applicability of the Forchheimer-type equation. Journal of Fluids Engineering: 126: 1: pp. 139-143.

[111] Montillet, A; Akkari, E; Comiti, J. (2007). About a correlating equation for predicting pressure drops through packed beds of spheres in a large range of Reynolds numbers. Chemical Engineering and Processing. Vol 46, pp. 329–333.
[112] Montillet, A; Comiti, J; Legrang, J. (1992). Determination of structural parameters of metallic foams from permeametry measurements, Journal of Material science: 27: pp. 4460-4464.
[113] Mousavi, S. A; Ammiri-Tokaldany, E; Davoudi, M. H. (2011). A relationship to determine the critical hydraulic gradient and non-cohesive sediment transport discharge in rockfill dams. Research Journal of environmental sciences: 5: 5: pp. 399-413.
[114] Nazemi, A; Shui, L. T; Davoudi, M. H; Halim, A; Ahmad, D. (2011). Critical Hydraulic Gradient of Non-cohesive Suspended Sediment Laden Flow Through Pervious Rockfill Dam. Australian Journal of Basic and Applied Sciences: 5: 7: pp. 1119-1126.
[115] Nield, D. A. (2001). Alternative models of turbulence in a porous medium, and related matters. J. of Fluids Engineering: 123: 4: pp. 928-931.
[116] Nield, D. A. (2000). Resolution of a paradox involving viscous dissipation and nonlinear drag in a porous medium. Transport in Porous Media: 41: 3: pp. 349-357.
[117] Nield, D. A; Bejan, A. (2013). Convection in Porous Media. 4nd Ed. Springer, New York, Ch. 1. 35.
[118] Olson, K. E; Haidar, S; Milton-Tayler, D; Olsen, E. (2004). Multiphase Non-Darcy Pressure Drop in Hydraulic Fracturing. Paper SPE 90406 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 26-29 September.
[119] Paek, J. W; Kang, B. H; Kim, S. Y; Hyun, M. (2000). Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials. International Journal of Thermophysics: 21: 2: pp. 453-464.
[120] Peter, K. Kitanidis. Introduction to geostatistics: applications to hydrogeology. Stanford-Cambridge program. Cambridge University Press, 1997.
[121] Pinson, F. (2006). Modélisation à l'echelle macroscopique d'un écoulement turbulent au sein d'un milieu poreux. Thèse de Doctorat. INP Toulouse.
[122] Puncochár, M; Drahoš, J. (2000). Limits of applicability of capillary model for pressure drop correlation. Chem. Engng Sci: 55: 8: pp. 3951-3954. ~~doi:~~
[123] Rode, S; Midoux, N; Latifi, M. A; Stork, A; Saatdjian, E. (1994). Hydrodynamic of liquid flows in packed beds: an experimental study using electochemical shear rate sensors. Chem. Engng Sci: 49: 6: pp. 889-900.
[124] Rose, H. E. (1945). On the resistance coefficient-Reynolds number relationship for fluid flow through beds of granular materials. Proc., Inst. Mech. Eng: 153: pp. 154-161.
[125] Rose, H. E; Rizk, A. M. A. (1970). Further researches in fluid flow through beds of granular materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Vol 160, pp. 493–503.
[126] Rumer, R. R. (1969). Resistance to flow through porous media. In Flow Through Porous Media, ed. R.J.M. De Wiest, 91-108. New York City: Academic Press.
[127] Rumer, R. R; Drinker, P. A. (1966). Resistance to laminar flow through porous media. Proc., Amer. Soc. Civil Eng: 92: HY5: pp. 155-164.
[128] Ruth, D; Ma, H. (1992). On the derivation of the Forchheimer equation by means of the averaging theorem. Transport in Porous Media: 7: 3: pp. 255-264.
[129] Sano, Y; Noguchi, K; Kuroiwa, T. (2009). An experimental investigation into the effective permeability of porous media whose matrices are composed of obstacles of different sizes. The open transport phenomena journal. Vol 1, pp. 15-19.

[130] Seguin, D; Montillet, A; Comiti, J. (1998a). Experimental characterization of flow regimes in various porous media—I: Limit of laminar flow regime. Chem. Eng. Sci: 39: 53: pp. 3751-3761.
[131] Seguin, D; Montillet, A; Comiti, J; Huet, F. (1998b). Experimental Characterization of Flow Regimes in Various Porous Media—II: Transition to Turbulent Regime. Chem. Eng. Sci: 53: pp. 3897-3909.
[132] Skjetne, E; Aurliault, J. L. (1999). High velocity laminar and turbulent flow in porous media. Trans. Porous Med: 36: pp. 131-147.
[133] Sabiri, N. E; Comiti, J. (1995). Pressure drop in non-Newtonian purely viscous fluid flow through porous media. Chem. Engng Sci: 50: 7: pp. 1193-1201.
[134] Sabiri, N ; Comiti, J. (1997a). Ecoulement de fluides newtoniens et non newtoniens á travers des lits fixes stratifies. Canadian Journal of Chemical Science: 75: pp. 1030-1037.
[135] Sabiri, N. E; Comiti, J. (1997b). Experimental validation of a model allowing pressure gradient determination for non-Newtonian purely viscous fluid-flow through packed beds. Chem. Engng Sci: 52: 20: pp. 3589-3592.
[136] Scheidegger, A. E. (1960). The Physics of Flow Through Porous Media.Toronto, Ontario, Canada: University of Toronto Press.
[137] Seguin, D; Montillet, A; Comiti, J. (1998a). Experimental characterisation of flow regimes in various porous media—I: limit of laminar flow regime. Chem. Engng Sci: 53: 21: pp. 3751-3761.
[138] Seguin, D; Montillet, A; Comiti, J; Huet, F. (1998b). Experimental characterisation of flow regimes in various porous media—II: Transition to turbulent regime. Chem. Engng Sci: 53: 22: pp. 3897-3909.
[139] Smith, M. B; Bale, A; Britt, L. K; Cunningham, L. E; Jones, J. R; Klein, H. H; Wiley, R. P. (2004). An Investigation of Non-Darcy Flow Effects on Hydraulic Fractured Oil and Gas Well Performance. Paper SPE 90864 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 26-29 September.
[140] Soualmia, A; Jouini, M; Masbernat, L; Dartus, D. (2017). Détermination de la ligne d'eau en milieux de grande porosité dans un canal experimental. La Houille Blanche. Vol 5, pp. 64-68.
[141] Soualmia, A; Jouini, M; Masbernat, L; Dartus, D. (2015). An analytical model for water profile calculations in free surface flows through rockfills. JTAM. Vol 53, pp. 209-2015.
[142] Soualmia, A; Jouini, M; Dartus, D. (2013). Study of flow through rockfill in channel = Etude des écoulements dans une mèche en canal. PCNJ. Vol 68, pp.86-91.
[143] Soulaine, C. (2012). Modélisation des écoulements dans les garnissages structurés : de l'échelle du pore à l'échelle de la colonne. Thèse de doctorat. INPT.
[144] Tadrist, L; Miscevic, M; Rahli, O; Topin, F. (2004). About the use of fibrous materials in compact heat exchangers. Exp. Therm. Fluid Sci: 28: pp. 193–199.
[145] Tallmadge, J. A. (1970). Packed bed pressure drop - an extension to high Reynolds numbers. AIChE Journal. Vol 16, pp. 1092–1093.
[146] Topin, F; Bonnet, J. P; Madani, B; Tadrist L. (2006). Experimental analysis of multiphase flow in metallic foam: flow laws, heat transfer and convective boiling. Adv. Eng. Mater: 8: pp. 890–899.
[147] Tsakiroglou, C. D. (2002). A methodology for the derivation of non-Darcian models for the flow of generalized Newtonian fluids in porous media. J. Non-Newtonian Fluid Mech: 105: (2-3): pp. 79-110.

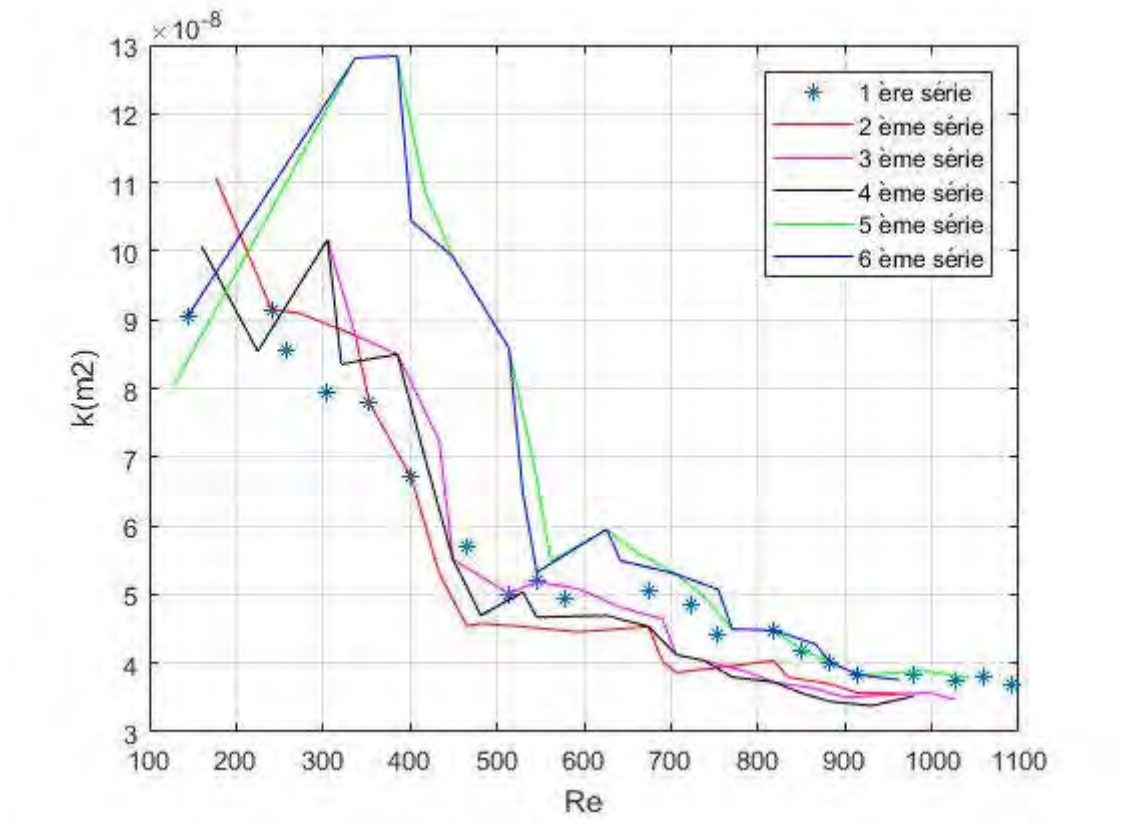
[148] Vafai, K; Tien, C. L. (1982). Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media. Int. J. Heat Mass Trans: 25: 8: pp. 1183-1190.
[149] Van Batenburg, D; Milton-Tayler, D. (2005). Discussion of SPE 89325,"Beyond Beta Factors: A Complete Model for Darcy, Forchheimer, and Trans-Forchheimer Flow in Porous Media." JPT: 57: 8: pp. 72-73.
[150] Van Der Merwe, D. F; Gauvin, W. H. (1971). Velocity and turbulence measurements of air flow through a packed bed. AIChEJ: 17:3: pp. 519-528.
[151] Vincent, M. C; Pearson, C. M; Kullman, J. (1999). Non-Darcy and Multiphase Flow in Propped Fractures: Case Studies Illustrate the Dramatic Effect on Well Productivity. Paper SPE 54630 presented at the SPE Western Regional Meeting, Anchorage, 26-27 May.
[152] Wahyudi, I; Montillet, A; Khalifa, A. (2002). Darcy and post-Darcy flows within different sands. Journal of Hydraulic Research: 40: 4: pp. 519-525.
[153] Wang, X; Thauvin, F; Mohanty, K. K. (1998). Non-Darcy flow through anisotropic porous media. Journal of chemical engineering science. Vol 54, pp. 1859-1869.
[154] Ward J.C. (1964). Turbulent Flow in Porous Media. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the ASCE. Vol. HY 5, pp. 1-12.
[155] Wegner, T. H; Karabelas, A. J; Hanratty, T. J. (1971). Visual studies of flow in a regular array of spheres. Chem. Engng Sci: 26: 1: pp. 59-63.
[156] Whitaker, S. (1996). The Forchheimer equation: A theoretical development. Transport in Porous Media: 25: 1: pp. 27-61.
[157] Whitaker, S. (1986). Flow in porous media 1: a theoretical derivation of Darcy's law. Transport in Porous Media. Vol 1, pp. 3–25.
[158] Wodie, J. C; Levy, T. (1991). Correction non linéaire de la Loi de Darcy. C. R. Acad. Sci. Paris Series II : 312: pp. 157-161.
[159] Yi, W; Shuyu, S; Bo, Y. (2013). On Full-Tensor Permeabilities of Porous Media from numerical Solutions of the Navier-Stokes Equation. Advances in Mechanical Engineering. Vol 2013, pp. 1-11.
[160] Younes A. (2003). On modelling the multidimensional coupled fluid flow and heat or mass transport in porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol 46, pp. 367–379.
[161] Zhong, W; Li, X; Liu, F; Tao, G. (2013). Measurement and correlation of pressure drop characteristics for air flow through sintered metal foam. Transp. Porous Med.

Annexes

Annexe 1

Mesure de l'incertitude et du bon fonctionnement de petit perméamètre de l'IMFT

Pour s'assurer du bon fonctionnement de petit perméamètre, on a réalisé six cycle de mesure de différence de pression dont trois cycle en commençant les mesures par le débit le plus fort et les trois autres en commençant par le débit le plus faible. On a obtenu la figure suivante.



Comparaison de six cycles de mesure pour le milieu poreux constitué de billes dans le petit perméamètre de l'IMFT

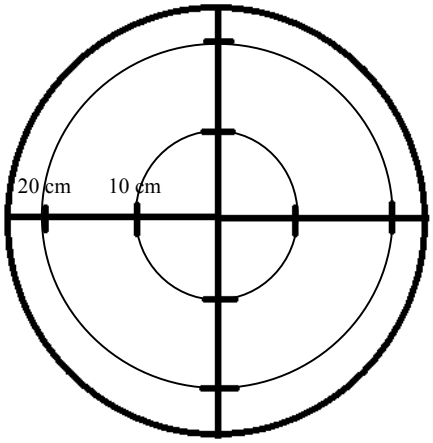
D'après la figure ci-dessus, on peut remarquer que sur six séries de mesures, on a quatre qui donnent des résultats très proches. Le décalage entre ses séries est négligeable. Seulement deux séries ont donné un décalage par rapport aux reste des série de mesures pour les écoulements à Re < 500 alors que pour les écoulements où Re>500 les six séries de mesures donnent des résultats très proches. Ceci reflète le bon fonctionnement du dispositif. Cette expérience est faite pour vérifier qu'il n'y a pas d'effet de paroi sur l'écoulement.

Annexe 2

Calcul de débit dans les deux perméamètres de l'IMFT

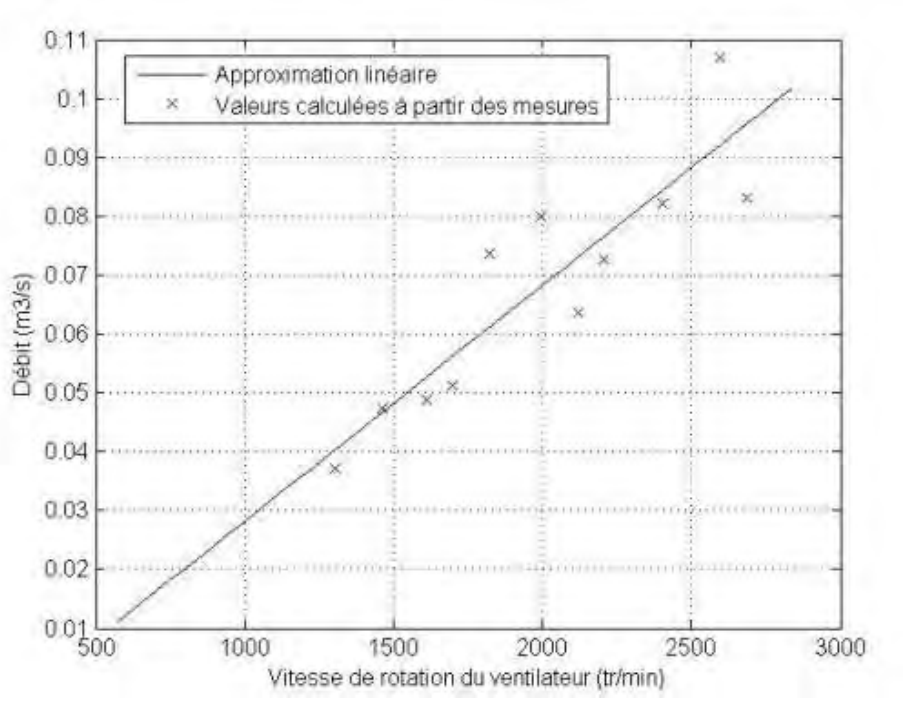
1. Principe de mesure de la vitesse dans le grand perméamètre de l'IMFT

Ce protocole a été mis en place en l'absence de la courbe de fonctionnement du ventilateur pour l'expérience envisagée. On a mesuré la vitesse de l'écoulement avec l'anémomètre à fil chaud sur les deux diamètres du cercle du perméamètre. En effet on a pris des mesures sur chaque segment à des distances de 10, 20 et 30 cm par rapport au centre, et ainsi on a obtenu des mesures de vitesse sur des diamètres de cercles de rayon 10 , 20 et 30 cm. On a calculé la moyenne des vitesses sur chaque cercle avant de déterminer celle des vitesses des 3 cercles pour un nombre de tour donné du ventillateur, ensuite on a tracé la courbe de variation de la vitesse en fonction du nombre de tour du ventillateur nous permettant de calculer le débit pour ces points. Enfin, on a interpolé pour obtenir des valeurs de débits quelque soit le nombre de tours.



Disposition des points de mesures des vitesses d'écoulement dans le grand perméamètre

Comme déjà dit, pour chaque cercle de diamètre donné on a mesuré la vitesse sur les quatre points des diamètres, puis on a calculé la vitesse moyenne correspondante ; enfin on a calculé la vitesse moyenne de l'écoulement des trois cercles dans le perméamètre correspondant à un nombre de tour du ventilateur donné ; par la suite on a calculé le débit d'écoulement correspondant à chaque vitesse et on a ainsi obtenu la courbe suivante.



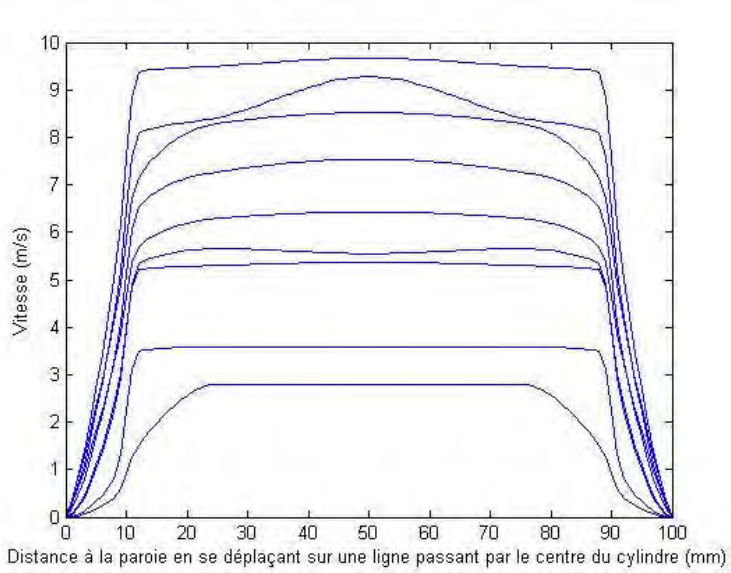
Simulation de la mesure du débit avec le grand ventilateur dans le grand perméamètre de l'IMFT

La figure ci-dessus montre que les débits d'écoulement obtenus avec le grand ventilateur dans le grand perméamètre varient entre 30 l/s et 83 l/s. la section traversée est de $S=0.45m^2$, d'où les vitesses varient entre 0.06 m/s et 0.18 m/s. Les billes en verre de diamètre moyen d=1cm ayant une porosité n=0.402, le nombre de Reynolds varie donc entre 95 et 300 sachant que la viscosité cinématique de l'air est de $\upsilon=15.6\ 10^{-6}\ m^2/s$.

Ainsi, les écoulements étudiés dans le grand perméamètre ne sont pas pleinement turbulents avec un Re maximale de 300. On a donc réalisé un deuxième perméamètre avec un diamètre de 10 cm.

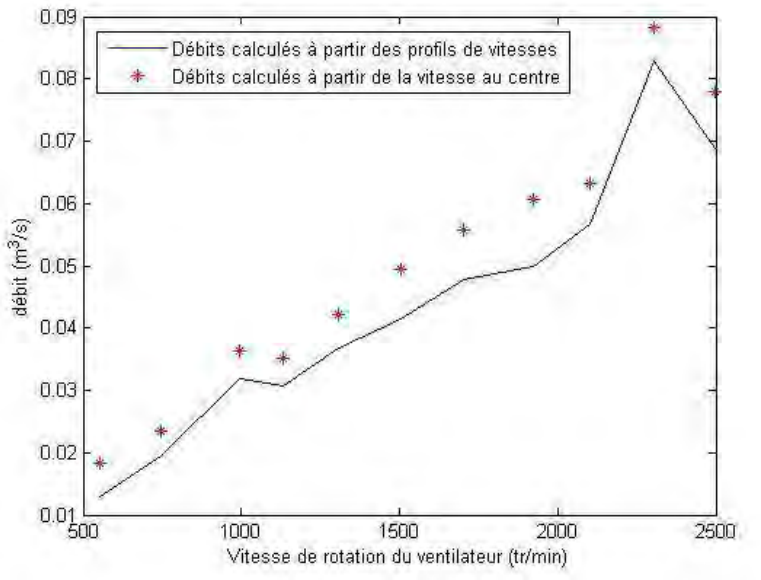
2. Principe de mesure de la vitesse dans le petit perméamètre de l'IMFT

la vitesse de l'écoulement dans ce dernier a été mesurée avec l'anémomètre à fil chaud sur le diamètre au niveau des point suivants en allant de la paroi, 0, 8, 12, 25, 50, 75, 88, 92 et 100 mm. Puis pour chaque nombre de tours par minute du ventilateur, on a tracé le profil de la vitesse le long du diamètre en ces points et ainsi on a obtenu les courbes suivantes.



Mesure du débit dans le petit perméamètre de l'IMFT pour les expériences avec des billes de diamètre d=1cm

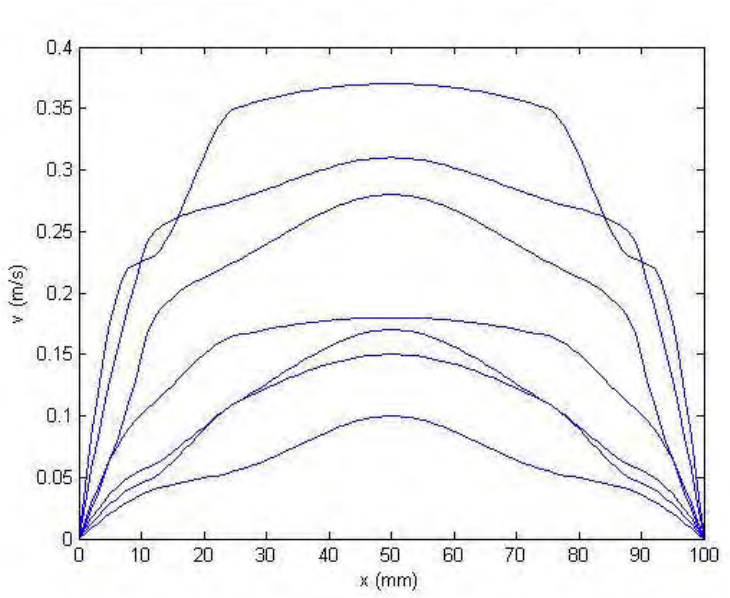
La figure montre que la distribution de la vitesse dans le petit perméamètre est homogène, ce qui nous a conduits à comparer la vitesse moyenne pour chaque nombre de tour/mn avec la vitesse mesurée au centre du perméamètre, et on a obtenu le graphe suivant.



Comparaison entre le débit déterminé en tenant compte seulement de la mesure au centre de tube (les points) et celui déterminé par la moyenne des mesure sur tous les points. Expérience avec les billes.

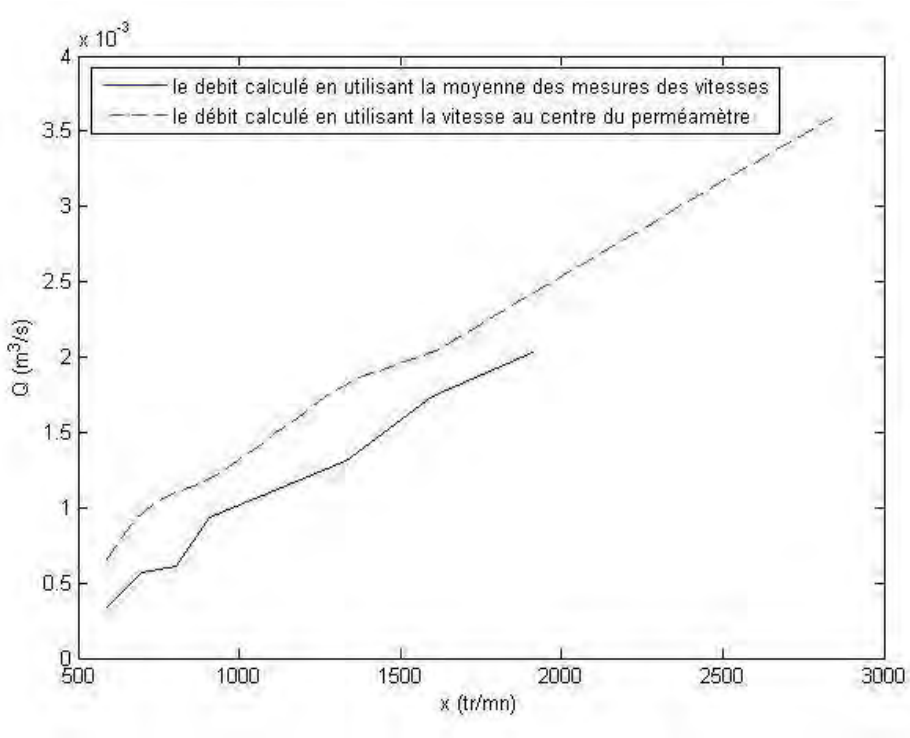
La figure ci-dessus montre que l'écart entre la vitesse moyenne calculée à partir des vitesses mesurées sur le diamètre du perméamètre et celle mesurée au centre est négligeable**.**

Ayant le même principe déjà détaillé dans le paragraphe précédent, la figure ci-dessous présente les résultats de mesure de la vitesse dans le petit tube en considérant un milieu poreux avec des cailloux.



Mesure de la vitesse d'écoulement dans le petit perméamètre de diamètre 100 mm

La figure ci-dessus présente les mesures de la vitesse réalisée avec l'anémomètre dans le petit perméamètre de l'IMFT. Etant donné que le diamètre de ce dernier est de 10 cm, on a mesuré la vitesse de l'écoulement sur les parois, et tous les 2.5 cm sur le centre pour chaque nombre de tours par minute. On a obtenu cette variation de la vitesse en fonction de la distance. Puis on a calculé le débit en utilisant la moyenne de la vitesse et seulement la valeur mesurée au centre du perméamètre. Ainsi on a obtenu la figure suivante.



Comparaison entre le débit obtenu en utilisant la vitesse d'écoulement mesurée au centre du petit perméamètre et celui obtenu en utilisant la moyenne des mesures des vitesses

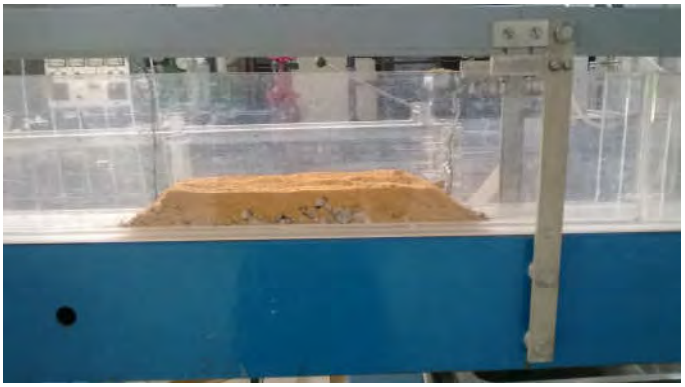
La courbe en ligne continue présente le débit calculé en utilisant la moyenne de variation de la vitesse, alors que celle discontinue présente le résultat de calcul en utilisant la vitesse au centre du perméamètre. D'après les résultats, on remarque une légère variation qui peut être négligée. Ainsi on a utilisé la valeur mesurée au centre du perméamètre pour le reste des expériences.

Dans la figure suivante, on regroupe les résultats obtenus pour différentes expériences réalisées.

Annexe 3

Les tests expérimentaux concernant le colmatage dans le petit canal.

Il faut noter qu'on a essayé de réaliser une expérience de colmatage dans le petit canal de l'INAT, mais vu la faible section de ce dernier ainsi que le faible débit fourni par la pompe, on n'a pas pu obtenir ou observer ce phénomène puisque la faible vitesse de l'écoulement n'a pas permis le transport et l'introduction du sable dans le milieu lorsqu'on l'injecte à l'entrée de la mèche. Donc on a proposé de mettre le sable au fond du milieu poreux pour observer s'il y aura transport de sable à l'intérieur du milieu dans les conditions hydrodynamiques du petit canal. Ci-après des figures des expériences de colmatage réalisées dans le petit canal.



Injection du sable au fond du milieu poreux (petit canal de l'INAT)



Effet de l'écoulement sur le fond sableux du transport milieu poreux (petit canal de l'INAT)

Ces figues montrent la déformation du fond sableux suite à l'écoulement d'eau ce qui indique qu'il y a eu un transport solide même à faible vitesse. Mais ce qui compte pour nous c'est d'observer plutôt le phénomène du colmatage des pores de ce milieu et puisqu'il s'est avéré impossible de le voir dans le petit canal, on a laissé pour l'instant la poursuite des expériences dans le petit canal, puisque d'autre part on ne peut pas obtenir un écoulement turbulent (vu les faibles débits) qui est la base de cette étude.