



HAL
open science

Migration de particules fines dans un milieu poreux : Application au phénomène de colmatage

Ghizlane Benosman

► **To cite this version:**

Ghizlane Benosman. Migration de particules fines dans un milieu poreux : Application au phénomène de colmatage. Autre. Ecole Centrale Paris, 2012. Français. NNT : 2012ECAP0032 . tel-00997415

HAL Id: tel-00997415

<https://theses.hal.science/tel-00997415>

Submitted on 28 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École Centrale Paris

Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux
CNRS UMR 8579

THÈSE

présentée par

Ghizlane BENOSMAN

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'École Centrale Paris

Specialité	Milieux poreux, filtration et Modélisation
Laboratoire d'Accueil	Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux
	Sujet :

**Migration de particules fines dans un milieu poreux :
application au phénomène de colmatage**

Prévue en ...devant la commission d'examen composée de :

-	Président
-	Rapporteur
-	Rapporteur
-	Examineur
-	Examineur
Mme. Arezou MODARESSI-FARAHMAND	Directrice de Thèse

Châtenay Malabry

« Dans les sciences, le chemin est plus important que le but.
Les sciences n'ont pas de fin. »
(Erwin Chargaff)

Migration de particules fines dans un milieu poreux : application au phénomène de colmatage

Mots-clés : *particules fines, transport et dépôt, colmatage, milieu poreux, perméabilité, modélisation.*

Résumé

La migration de particules fines dans un milieu poreux fait l'objet de nombreuses études dans différents domaines. Par exemple, la présence de particules fines dans les nappes phréatiques constitue des voies de transfert de polluants (*e.g.* bactéries, virus, métaux lourds) à travers les sols. Par ailleurs, les phénomènes complexes d'adsorption et de désorption des particules fines dans le milieu poreux sont la cause de multiples dégâts dans les systèmes hydrauliques (*e.g.* digues, puits pétroliers, filtres de traitements des eaux). Les particules fines forment des agrégats et se déposent autour des grains collecteurs affectant la perméabilité du milieu poreux. Ainsi, différents processus mécaniques et/ou physico-chimiques contrôlent le colmatage de la matrice poreuse.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de l'hétérogénéité du milieu poreux (*i.e.* granulométrie, porosité) sur les phénomènes de transport et de dépôt des particules colloïdales en suspension. La finalité de ce travail est de donner un modèle prédictif de perméabilité afin de pouvoir estimer la pérennité du système. Dans ce but, une campagne d'essais expérimentaux est menée sur le suivi du transport et du dépôt des particules fines argileuses dans différents milieux naturels sableux. Ces travaux ont été réalisés dans des colonnes de laboratoire pour lesquels les conditions hydrauliques peuvent être contrôlées et où la concentration des fines à l'entrée de la colonne est imposée. Après injection des particules fines, le suivi de la matrice poreuse dans l'espace et dans le temps est réalisé en utilisant un banc gamma-densimétrique. L'évolution de la perméabilité caractérisant le colmatage du matériau est analysée par l'intermédiaire de la mesure de la chute de pression dans la colonne.

Les expériences menées dans les différentes colonnes ont permis de mettre en évidence l'importance de la taille des grains et la porosité du milieu ainsi que la vitesse d'injection dans la formation du dépôt. D'après nos résultats, au début de l'essai le dépôt de particules se fait autour des collecteurs sur des sites de surface. Ensuite les ponts de liaison sont créés entre les grains collecteurs. Nous avons constaté que la première partie du dépôt est plus importante dans le cas de grains de taille importante. Afin d'interpréter les résultats de l'évolution de la perméabilité, nous avons utilisé le modèle de Kozeny-Carman, où nous avons introduit l'évolution du dépôt dans l'estimation de la surface spécifique du milieu. Ce modèle nous a permis

également de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu et l'évolution de chaque couche par l'intermédiaire des paramètres tels que la porosité et la tortuosité du milieu. Les observations microscopiques et les mesures de porosités sur les échantillons colmatés ont étayé les schémas de dépôt et de saturation des sites de rétention.

Ce travail expérimental s'accompagne d'une modélisation par l'équation de convection-dispersion avec un terme de puits simulé par une cinétique du second ordre. Elle met en évidence l'importance des particules déjà déposées ainsi que la porosité initiale du milieu et la vitesse d'écoulement.

Table des matières

Motivations et plan de la thèse	1
1 Filtration en milieux poreux granulaires	7
1.1 Introduction	7
1.2 Facteurs intervenant lors d'une filtration en profondeur	8
1.2.1 Différents types de filtration	9
1.2.2 Sites de rétention des particules	10
1.2.3 Processus de capture et de réentraînement des particules	11
1.2.4 Forces exercées lors de la filtration	15
1.2.5 Types de filtration en profondeur	17
1.3 Synthèses des travaux précédents : transport des particules	21
1.3.1 Introduction	21
1.3.2 Transport des particules : les paramètres importants	23
1.4 Démarche adoptée pour l'orientation des recherches	28
1.4.1 Choix des matériaux	28
1.4.2 Choix de la méthode expérimentale	29
2 Présentation des expériences	31
2.1 Position du problème	32
2.2 Dispositif du pilote de filtration	32
2.3 Procédure expérimentale mise en place	34
2.4 Méthodes et techniques de caractérisation des matériaux utilisés	37
2.4.1 Analyse des données de base	37
2.4.2 Analyse de la granulométrie	38
2.4.3 Estimation de la porosité : Gammadensimétrie	40
2.4.4 Préparation des échantillons prélevés après les essais de filtration	41
2.4.5 Distribution porale : étude de la porosimétrie par injection de mercure	43
2.4.6 Observations microscopiques	46

2.5	Caractérisation des matériaux utilisés lors des essais	47
2.5.1	Les milieux poreux utilisés : sable	47
2.5.2	Les particules fines injectées : argile	49
2.5.3	Critère de pénétrabilité	57
2.6	Incertitude sur les mesures	59
2.6.1	Gammadensimétrie	59
2.6.2	Estimation des incertitudes de mesure de la densité	60
2.7	Synthèse sur les essais de filtration des particules fines à réaliser	61
2.8	Conclusion	62
3	Résultats et interprétation des essais	63
3.1	Introduction	63
3.2	Résultats des essais expérimentaux	65
3.2.1	Essais de perméabilité	65
3.2.2	Profils de densité	72
3.3	Modèle de perméabilité	74
3.3.1	Modèle de Hazen-Taylor	75
3.3.2	Modèle de NAVFAC DM7	76
3.3.3	Modèle de Kozeny-Carman	76
3.3.4	Modèle de Chapuis	77
3.4	Évolution de la perméabilité	80
3.4.1	Évolution de la porosité	81
3.4.2	Détermination de la surface spécifique	92
3.4.3	Évolution de la surface spécifique	94
3.5	Conclusion	111
4	Modélisation de la filtration	113
4.1	Introduction	114
4.2	Les modèles numériques	116
4.2.1	Les modèles réseaux	116
4.2.2	Les modèles stochastiques	117
4.2.3	Les modèles d'analyse de trajectoire	118
4.2.4	Les modèles phénoménologiques	120
4.2.5	Choix du type de modèle de filtration	121
4.3	Approche macroscopique du problème de la filtration	121
4.3.1	Conservation de la masse du fluide	122
4.3.2	Conservation de la masse des particules en suspension	123

4.3.3	Taux de dépôt	127
4.4	Théorie de la filtration	127
4.4.1	Cinétique de la filtration du premier ordre	128
4.4.2	Cinétique de la filtration du second ordre	130
4.4.3	Prédiction du coefficient de filtration-dépôt	133
4.4.4	Synthèse sur le modèle de filtration	134
4.5	Modèle macroscopique développé	135
4.5.1	Mise en équation du problème	137
4.5.2	Étude des paramètres du modèle : $\lambda_0, C_{im,max}$	138
4.5.3	Bilan du modèle développé	163
4.5.4	Analyse de sensibilité des résultats	163
4.6	Conclusion	166
	Conclusions et perspectives	169
	Bibliographie	180
	A Mode opératoire	181
A.1	Présentation du pilote expérimental	181
A.2	Étalonnage des capteurs	183
A.2.1	183
A.2.2	183
A.2.3	183
A.3	Manipulation de la colonne	184
A.3.1	Isolement d'une colonne	184
A.3.2	Démontage d'une colonne	184
A.3.3	Remplissage et remise en place d'une colonne	186

Les différentes variables utilisées dans ce travail sont présentées ici avec leurs dimensions.

L : dimension d'une longueur (unité SI : le mètre) ;

T : dimension d'un temps (unité SI : la seconde) ;

M : dimension d'une masse (unité SI : le kilogramme) ;

Grandeurs	Dimension	Définition
A	L^2	Section de la colonne
Cu	-	Coefficient de forme
C	$M.L^{-3}$	Concentration de particules fines
C_t	T^{-1}	Taux de comptage
C_{im}	$M.L^{-3}$	Concentration de particules fines immobiles
c	-	Coefficient de Kozeny-Carman
d	L	Diamètre intérieur de la colonne
D_a	L	Diamètre d'accès aux pores
D_H	$L^2.T^{-1}$	Coefficient de dispersion hydrodynamique
D	$L^2.T^{-1}$	Coefficient de diffusion
d_g	L	Diamètre du collecteur-grain
d_p	L	Diamètre de la particule fine
g	$L.T^{-2}$	Accélération gravitationnelle
e	$L^3.L^{-3}$	Indice des vides
H	L	Profondeur de la colonne
ΔH	L	Perte de charge
i	-	Gradient hydraulique
K	$L.T^{-1}$	Conductivité hydraulique
k	L^2	Perméabilité intrinsèque
k_b	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$	Constante de Boltzman
N_0	-	Nombre de photons incident dans l'air
N	-	Nombre de photons ayant traversé la colonne
n_p	-	Nombre de particules fines
n_g	-	Nombre de collecteurs grains
P	$M.L^{-1}.T^{-2}$	Pression
P_{Hg}	$M.L^{-1}.T^{-2}$	Différence de pression du ménisque
T	°C	Température
t	T	Temps
Q	$L^3.T^{-1}$	Débit

S	L^{-1}	surface spécifique
u	$L.T^{-1}$	Vitesse du fluide à l'échelle des pores
v	$L.T^{-1}$	Vitesse moyenne du fluide
v_s	$L.T^{-1}$	Vitesse de sédimentation

Lettres grecques

ρ	$M.L^{-3}$	Masse volumique
ρ_p	$M.L^{-3}$	Masse volumique des particules fines
ρ_s	$M.L^{-3}$	Masse volumique des grains collecteurs
ρ_w	$M.L^{-3}$	Masse volumique du fluide
μ	$M.L^{-1}.T^{-1}$	Viscosité dynamique du fluide
μ_m	$L^2.M^{-1}$	Adsorption massique du matériau étudié
σ_{Hg}	$M.T^{-2}$	La tension superficielle du mercure
θ_{Hg}	°	Angle de raccordement du ménisque
ϕ_0	$L^3.L^{-3}$	Porosité initiale du milieu granulaire
ϕ	$L^3.L^{-3}$	Porosité du milieu granulaire à l'instant t
λ_d, λ_0	T^{-1}	Coefficient de filtration
λ_r	T^{-1}	Coefficient de la cinétique de relarguage
λ	T^{-1}	Coefficient de la cinétique de filtration
β	-	Coefficient représentant la fraction d'eau mort
η_0	-	Efficacité du collecteur

Liste des acronymes

MEB	Microscope Électronique à Balayage
DRX	Diffraction par rayon X
L-MSSMat	Laboratoire mécanique des sols structures et matériaux
ECP	École Centrale Paris

Motivations et plan de la thèse

L'eau est un élément vital à notre survie, longtemps adulée dans certaines croyances, elle a toujours été présentée sous différents aspects, à la fois destructrice (*i.e.* marais, effondrement de digue), mais aussi la source de vie (*i.e.* guérisseuse, protectrice et purificatrice).

Les eaux souterraines propres à la consommation humaine peuvent subir certaines pollutions d'origine naturelle ou anthropique. Ces eaux souterraines en écoulement transportent des particules fines, dont les colloïdales, de tailles comprises entre 1nm et 10 μ m. Les particules sont détachées du point d'origine (roches mères), transportées à travers le milieu et ensuite déposées à d'autres endroits. Les colloïdes naturels en suspension seuls ne constituent pas un grand danger, cependant, par des phénomènes d'adsorption à leur surface, ils véhiculent à travers le sol des polluants de divers origines (*i.e.* organiques, bactéries, métaux lourds, virus). L'adsorption des polluants à la surface des colloïdes permet aux polluants de parcourir de longues distances et de se déposer dans différentes couches. Les phénomènes physico-chimiques font que les polluants se détachent des particules fines en suspension par désorption et se déposent dans le milieu. Les phénomènes hydrodynamiques font que l'ensemble de l'agrégat (particules colloïdales et polluants) peut être entraîné vers les sites de rétention provoquant un blocage des entrées de pores. Pour comprendre la contamination associée au transport colloïdal, nous avons besoin de savoir comment le mouvement des particules colloïdales est affecté par les conditions hydrauliques et géochimiques dans le milieu.

Outre la problématique très importante de la pollution des eaux souterraines, le phénomène de transport des particules fines peut être rencontré dans un large éventail de situations industrielles tels que la production de pétrole, l'érosion des particules dans les sols affectant les ouvrages en génie civil et le bon fonctionnement des lits filtrants en profondeur pour des barrières anti-pollution. La présence de quantité importante de colloïde dans les systèmes hydrauliques n'est pas favorable au bon fonctionnement du procédé, par exemple, les résidus miniers qui constituent des boues à très haute teneur en eau constituent la source des quantités importantes des colloïdes dans les bassins de décantation.

Également, les mouvements et les dépôts des particules sont connus pour être à l'origine de sérieux problèmes dans les réservoirs de pétrole. Les hydrocarbures sont récupérés des réservoirs

au moyen de puits forés jusqu'à la surface. Pour améliorer le facteur de récupération du pétrole, diverses techniques sont utilisées afin de maintenir la pression du réservoir et diriger le pétrole vers les puits de production. Une des techniques les plus courantes est l'injection d'eau (*e.g.* eau fraîche, eau de mer, eau de formation dans les réservoirs d'huile) en utilisant des puits d'injection. Cependant, des réductions de perméabilité ont été observées dans de nombreux réservoirs. Plusieurs sources sont reconnues comme pouvant contribuer à une réduction de la production. Parmi-elles, les particules solides introduites par inadvertance dans les milieux poreux à la suite de dommages dans le système de forage. Par ailleurs, les fluides de récupération injectés sont chargés de particules fines avec des propriétés physico-chimiques (concentration en sel dans l'eau, nature des particules fines). Les fluides comme la saumure mis en contact avec la formation rocheuse peuvent être sensibles entraînant des phénomènes de mouvement de particules, des détachements dans la formation et même des réactions de précipitations. Ces particules présentes en suspension dans l'eau d'injection peuvent faire partie de la gamme de molécules formant des solutions colloïdales (diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$).

Une autre problématique de la migration des particules fines sous l'effet d'un écoulement est l'érosion interne dans les ouvrages hydrauliques. En génie civil, l'érosion interne constitue un risque majeur d'instabilité dans les ouvrages en terre (*e.g.* digues, chaussées). Le transport de particules fines est la cause de 46% des ruptures de barrages en remblai, ce qui occasionne des désastres humains et financiers très importants. Sous l'action d'un écoulement, les particules fines qui constituent l'ouvrage hydraulique peuvent être arrachées et transportées vers d'autres milieux poreux. Par conséquent, les porosités locales ainsi que les granulométries des constituants du système hydraulique sont modifiées, provoquant des changements au niveau des propriétés hydrauliques et mécaniques de l'ouvrage. Comme répercussion de la migration de particules, des pertes de l'étanchéité et des effets renards peuvent apparaître ainsi que des instabilités de l'ouvrage (tassement, glissement). Tout cela conduit à la formation de brèches qui provoquent des ruptures dans les barrages.

D'un autre côté, le colmatage est un problème majeur lors de l'exploitation et la maintenance associées à de nombreuses applications impliquant l'écoulement souterrain pour le traitement des eaux usées ou polluées et peut finir par limiter la durée de vie du système. Par exemple, pour traiter les eaux souterraines polluées, il existe différentes méthodes, parmi lesquelles on citera par exemple les Barrières Perméables Réactives (BPR). La barrière est constituée de filtres perméables laissant passer les particules fines polluantes sous un gradient hydraulique naturel. Le transport et le dépôt des particules fines dans la barrière constituée d'un milieu granulaire s'accompagnent souvent d'un colmatage du milieu poreux et cela dépend de plusieurs facteurs. La difficulté de l'étude se situe dans les différents paramètres qui entrent en jeu, tels que les conditions hydrodynamiques, les conditions physico-chimiques, la microstructure du milieu

poreux, les propriétés des particules fines polluantes ainsi que les mécanismes de transport et de capture des particules fines à travers le milieu poreux.

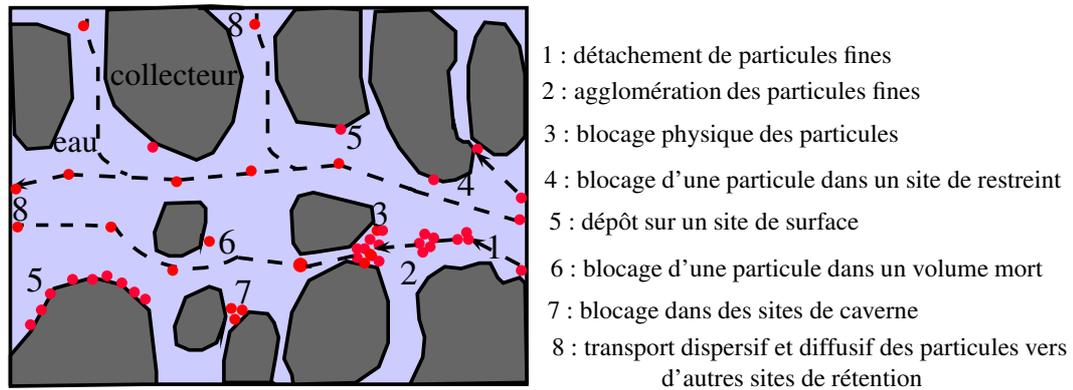


Figure 1 – Processus contrôlant la mobilité des particules colloïdales dans un milieu poreux saturé.

Dans tous les cas, les particules solides en suspension se déposent progressivement autour des collecteurs dans des espaces poreux accessibles par les différents processus mécaniques ou physico-chimiques qui peuvent être prédominants dans le milieu. La figure 1 regroupe les différents procédés de capture. Ces formations de dépôt créent deux phénomènes problématiques, (i) au début une augmentation significative des concentrations en polluants qui peut dépasser les concentrations acceptables, par exemple dans le cas des nappes phréatiques, (ii) une accumulation locale des particules fines qui affectent la perméabilité et donc le bon fonctionnement de l'ouvrage (*e.g.* digues de barrage, puits de forage). Si la perméabilité locale est affectée, un dysfonctionnement de l'ouvrage hydraulique est occasionné et la pérennité de l'ouvrage peut être touchée.

L'objectif général de ce travail est d'étudier expérimentalement et numériquement la migration des particules fines et leurs dépôts dans les différentes couches du milieu poreux. L'étude est abordée en utilisant à l'échelle du laboratoire, des colonnes d'essais constituées de sables de tailles polydisperses, constituant des porosités non homogènes. À travers les milieux poreux, des solutions de faibles concentrations en particules argileuses sont injectées et cela en variant le débit. Ce travail est organisé en quatre parties à l'issue desquelles des conclusions et perspectives sont données :

- La première partie expose un état de l'art sur la filtration en milieu poreux. Elle évoque les différentes filtrations pouvant être rencontrées, les forces qui interagissent entre les différents constituants du milieu et les mécanismes de transport-dépôt mis en jeu. Une synthèse des études et des résultats évoqués dans la littérature sur le transport et le dépôt des particules dans les milieux poreux est décrite, suivie par les objectifs et la démarche

scientifique choisie dans le cadre de cette thèse.

- La deuxième partie est consacrée aux essais expérimentaux. Le pilote expérimental utilisé est détaillé ainsi que les autres matériels qui ont permis la caractérisation des phénomènes rencontrés. La suite est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés (sable, kaolinite P300) et enfin la mise en place de l'essai expérimental avec le choix des différentes conditions expérimentales sont décrits.
- Dans la troisième partie, les résultats des essais expérimentaux sont présentés. L'interprétation de l'évolution des perméabilités expérimentales est décrite par les modèles de perméabilités déjà existants (*i.e.* Kozeny-Carman, Chapuis, Hazen). Les différentes hypothèses permettant d'interpréter les différentes évolutions de perméabilité des filtres dans le temps sont détaillées, en s'appuyant sur les essais à l'échelle microscopique.
- Dans la quatrième partie, la modélisation des mécanismes de transport et de dépôt observés dans le chapitre précédent est étudiée. Tout d'abord un état de l'art sur les modèles existants dans la littérature est donné. À partir des différents résultats à l'échelle de la colonne et à l'échelle des pores, le développement d'un modèle macroscopique de convection dispersion avec un terme puits est exposé. L'apport de ce travail est en partie dans la détermination du terme puits qui prend en compte les particules déjà déposées, les capacités maximales de particules déposées en fonction de la porosité, les tailles et la rugosité des particules de sables, les tailles des particules fines argileuses et les débits d'injection.
- Dans la dernière partie, les conclusions issues des travaux expérimentaux et de la modélisation sont présentées avec les principaux résultats trouvés. Enfin des perspectives sont proposées afin d'améliorer l'étude et la compréhension du phénomène de transport et de dépôt dans des milieux naturels.

Chapitre 1

Filtration en milieux poreux granulaires

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	Facteurs intervenant lors d'une filtration en profondeur	8
1.2.1	Différents types de filtration	9
1.2.2	Sites de rétention des particules	10
1.2.3	Processus de capture et de réentraînement des particules	11
1.2.4	Forces exercées lors de la filtration	15
1.2.5	Types de filtration en profondeur	17
1.3	Synthèses des travaux précédents : transport des particules	21
1.3.1	Introduction	21
1.3.2	Transport des particules : les paramètres importants	23
1.4	Démarche adoptée pour l'orientation des recherches	28
1.4.1	Choix des matériaux	28
1.4.2	Choix de la méthode expérimentale	29

1.1 Introduction

Le transport de particules fines dans un milieu poreux structuré fait l'objet de nombreuses études depuis plusieurs dizaines d'années, dans différents domaines : pétroliers (Moghadasi *et al.*, 2004), environnementaux (particule colloïdale vecteur de pollution) (McCarthy et Zachara, 1989) et industriels. Ces travaux ont donné naissance à de nombreuses approches théoriques et

empiriques ainsi qu'à différentes classifications des mécanismes de dépôt rencontrés. La difficulté de l'étude se situe dans la variété des différents paramètres qui entrent en jeu, telles que les conditions hydrodynamiques, les conditions physico-chimiques, la microstructure du milieu poreux, les propriétés des particules fines ainsi que les mécanismes de transport et de capture des particules fines à travers le milieu poreux granulaire. En raison de tous ces facteurs, le problème de la modélisation de transport-dépôt reste encore ouvert.

Dans ce chapitre, une première partie est consacrée à la filtration, en passant en revue les phénomènes intervenant dans ce procédé, les paramètres qui la conditionnent et les forces exercées ainsi que les mécanismes de capture des particules dans le filtre. Selon les orientations des travaux, il existe dans la littérature différentes organisations pour la classification des paramètres de filtration, allant de la plus générale à la plus détaillée et cela à différentes échelles (à l'interface \rightarrow à l'échelle du collecteur \rightarrow à l'échelle du filtre). Dans la deuxième partie, nous allons donner une liste non exhaustive des travaux de filtration de particules fines, en regardant l'influence de certains paramètres ainsi que les conditions d'essais. Enfin nous évoquerons le choix de la technique de filtration ainsi que les matériaux utilisés.

1.2 Facteurs intervenant lors d'une filtration en profondeur

On appelle filtration, le procédé permettant de séparer les particules et le fluide dans lequel les particules s'y trouvent en suspension par le biais d'un milieu poreux. Ce phénomène se trouve dans les sous-sols en contact avec la nappe phréatique, dans des digues de barrages en terre,... etc . Il ne faut pas confondre la filtration à travers un milieu avec l'infiltration qui désigne la pénétration au départ du fluide dans le milieu par le phénomène d'injection.

La technique de filtration des particules fines dans un milieu poreux s'accompagne généralement par un blocage des pores souvent dû au dépôt de particules fines, ou bien au dépôt de particules formées par des précipités chimiques dans le cas de réactions chimiques entre les sols et les eaux polluées. Afin de comprendre le mécanisme de filtration d'une particule (*e.g.* colloïde, matière en suspension, précipité, aérosols) dans un milieu poreux (*e.g.* sableux, membrane, géotextiles, bille de verre), il faudrait se poser les questions suivantes : quel type de filtration est adapté à notre problème ? quel type de site de rétention existe-t-il au sein du milieu poreux ? quelles sont les forces d'entraînement et de capture dominantes dans le domaine ? Tous ces points seront développés dans les paragraphes suivants.

1.2.1 Différents types de filtration

Lors de la filtration de particules à travers un milieu poreux, un dépôt de particules entraîne une obturation. De ce fait, il est nécessaire de positionner les paramètres qui influencent la rétention de particules, dans le but de maintenir la pérennité du filtre le plus longtemps possible. Les paramètres à imposer et à contrôler sont :

1. Le milieu poreux : décrit par la porosité, le diamètre et la forme des pores, le diamètre et la forme des grains dans le cas d'un filtre granulaire ;
2. Les particules présentes dans la suspension : elles sont caractérisées par leur concentration, leur taille, leur forme et leur densité ;
3. Le fluide : il est caractérisé par le débit d'écoulement, la viscosité, la densité, le pH, la force ionique et la température dans le milieu.

Suivant les différents types de particules, ainsi que leurs propriétés, Ghidaglia (1994) et Nadji (1998) mettent en avant quatre types de filtration afin de procéder à la séparation particules - fluide (Figure 1.1). Elles sont présentées dans les paragraphes suivants :

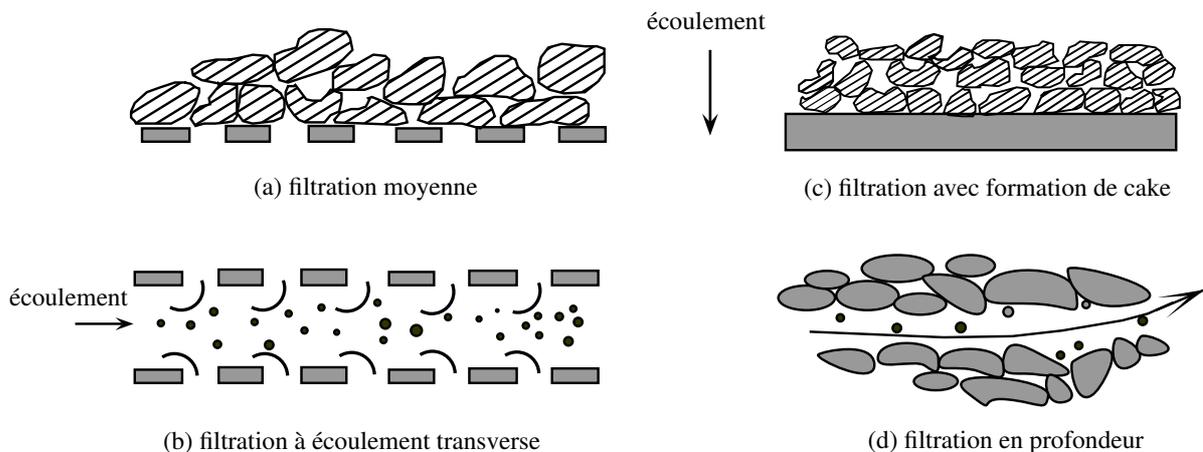


Figure 1.1 – Différents types de filtration.

Filtration moyenne

Dans ce procédé, on choisit une taille des pores plus petite que les particules de la suspension à filtrer. Pour les particules de dimensions supérieures à $50\mu\text{m}$, le filtre est utilisé comme un tamis. Pour les petites particules, on utilise le plus souvent des membranes dont la taille de pores est bien déterminée. Cette méthode de filtration conduit à une obturation très rapide du filtre ce qui nécessite des arrêts réguliers du processus de filtration pour nettoyer le filtre.

Filtration transverse

Dans ce procédé, on choisit une direction de l'écoulement de la suspension parallèle à la surface du milieu filtrant. Cela est assuré par un taux de cisaillement de manière à éviter le dépôt de particules dans les pores. Ce choix préserve la continuité du procédé de filtration en évitant le colmatage du milieu poreux.

Filtration avec formation de cake

Ce procédé de filtration est utilisé pour les suspensions fortement concentrées. Il comporte deux étapes :

1. Les particules solides s'accumulent tout d'abord dans les pores ;
2. La filtration à travers le paquet de particules solides déjà déposées, dans ce cas le dépôt de particules est important et le filtre se colmate rapidement.

Filtration en profondeur

Ce procédé de filtration a été utilisé pour la clarification des eaux. Dans ce cas, la filtration des particules en suspension est appliquée pour des concentrations inférieures ou égales à 0,5g/l (Tien et Payatakes, 1979) et pour des particules de dimensions inférieures à $30\mu\text{m}$. Ces particules en suspension de tailles inférieures à la taille des pores pénètrent dans le milieu poreux et y circulent suivant les lignes d'écoulement. Certaines de ces particules sous l'action de forces multiples se déposent à différentes profondeurs du milieu filtrant d'où le nom de filtration en profondeur. Développée par Herzig *et al.* (1970), la théorie repose sur l'étude des profils de concentration et de rétention à l'intérieur des lits poreux.

Les particules qui circulent dans le milieu poreux peuvent subir certains blocages dans des sites de rétention. Une particule indépendante se dépose soit sous l'effet des forces d'attraction exercées, soit par blocage physique lors de la filtration dans des passages trop étroits. On peut avoir l'interaction de plusieurs facteurs de blocage instantanément. Les différents facteurs intervenant lors d'un blocage d'une particule dans un milieu poreux sont détaillés dans les prochains paragraphes.

1.2.2 Sites de rétention des particules

Les sites de rétention des particules en milieux poreux ont été distingués par Delanchambre (1966). Il décrit quatre types principaux (Figure 1.2), selon le blocage de la particule à l'entrée du milieu ou en profondeur dans les couches du milieu, qui sont :

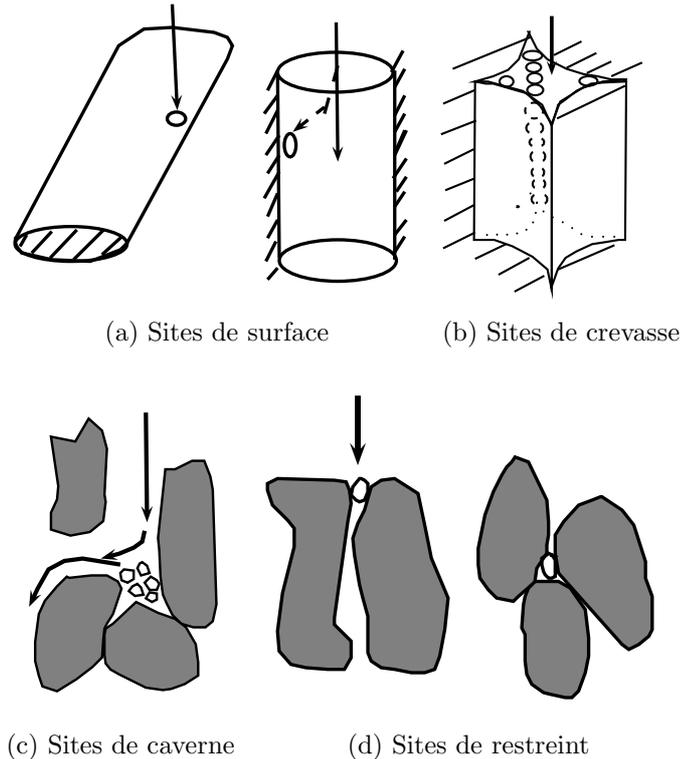


Figure 1.2 – Sites de rétention (Delanchambre, 1966).

- Sites de surface (Figure 1.2a) : la rétention de la particule se fait sur la surface du milieu poreux. Lorsque la surface du milieu est orientée normalement à la direction d'écoulement de la suspension, la pression cinétique peut appliquer la particule encore en suspension contre cette surface et ainsi contribuer à la stopper.
- Sites de crevasse (Figure 1.2b) : la particule en suspension se trouve au voisinage de la ligne de contact entre deux surfaces convexes. La particule peut être retenue par coincage mécanique dans la crevasse.
- Sites de caverne (Figure 1.2c) : les sites ont des formes concaves et se trouvent généralement dans les coudes des pores, de sorte que le fluide qui s'y trouve soit immobile et ne participe pas à l'écoulement.
- Sites de restreint (Figure 1.2d) : les sites qui se trouvent en amont d'un rétrécissement de pores dont les dimensions sont inférieures à celles des particules en suspension. Le site le plus fréquent est formé par trois grains convexes en contact.

1.2.3 Processus de capture et de réentraînement des particules

La particule en mouvement dans le fluide peut subir un entraînement vers un des sites de rétention décrits auparavant. La collision des particules fines sur une surface du milieu, appelée

« collecteur », peut entraîner la capture de la particule dans un site et cela suivant différents mécanismes. Cette collision est fonction de plusieurs paramètres à la fois physiques, tels que la vitesse de l'écoulement, les diamètres des pores, la densité et la taille de la particule fine, mais aussi chimiques, tels que les charges surfaciques, le pH du milieu et la force ionique. L'organisation de la liste des mécanismes peut différer d'une publication à une autre. [Delanchambre \(1966\)](#) avance que le transport vers un site de rétention peut s'effectuer suivant quatre procédés de capture. La figure 1.3 présente les mécanismes de capture dominant d'une particule vers un collecteur, par sédimentation, interception directe et mouvement brownien.

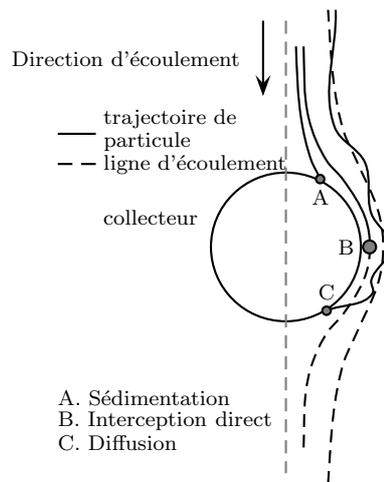


Figure 1.3 – Mécanismes de transport et de capture dominant pour une particule dans un collecteur sphérique ([Tien et Payatakes, 1979](#)).

- **La sédimentation** (Figure 1.3 cas A) : la collision des particules avec un collecteur (un grain du filtre) se fait soit sous l'action de la force de pesanteur, soit à cause de leur inertie lors de changements de direction d'écoulement. Les particules vont être déviées des lignes de courant dans le sens de la force gravitationnelle. Le paramètre qui contrôle la force gravitationnelle pour les particules en suspension sphériques de diamètre d_p est exprimé par la loi de Stokes. La vitesse de sédimentation (équation 1.1) est donnée par :

$$v_s = \frac{g}{18 \cdot \mu} \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot d_p^2 \quad (1.1)$$

avec μ la viscosité dynamique du fluide, g l'accélération gravitationnelle, ρ_p et ρ_f les densités respectivement de la particule et du fluide. Cet effet s'annule lorsque les particules ont la même masse volumique que le fluide ;

- **L’interception directe** (Figure 1.3 cas B) : les particules en mouvement suivent les lignes de courant du fluide. Cependant n’ayant pas la possibilité de se déformer comme le fluide, elles peuvent entrer en collision avec un collecteur et être arrêtées dans des sites de crevasse, ou bien par des sites de restreint provoqués par des changements de taille des pores ;
- **La diffusion** (Figure 1.3 cas C) : ce processus n’est valable que pour les particules dont la dimension est inférieure au micron. Il résulte du mouvement brownien aléatoire des particules dans le fluide qui dévient des lignes de courant. En l’absence de forces d’interaction de surface, le coefficient de diffusion s’écrit :

$$D = \frac{k_b \cdot T}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \quad (1.2)$$

où : k_b est la constante de Boltzman et T est la température absolue.

- **Par entraînement ou par effets hydrodynamiques** au sein du fluide et en raison de l’effet non uniforme de cisaillement et en présence de particules non sphériques, des effets hydrodynamiques peuvent se produire. Cela provoque la migration latérale des particules en suspension qui peuvent être mis en contact de cette façon avec les sites de rétention.

Par ailleurs [Nadji \(1998\)](#) et [Ghidaglia \(1994\)](#) ajoutent deux autres mécanismes qui entraînent la capture de particules : le blocage d’une particule dans un volume mort et la déposition due aux forces électrostatiques :

- **Blocage d’une particule dans un volume mort** : ce type de capture concerne les particules de diamètre supérieur à $1 \mu\text{m}$, non soumises aux charges extérieures (électrostatiques, par exemple). Les trajectoires des particules sont confondues avec les lignes de courant quand elles se trouvent assez loin du collecteur. Cependant, cela tend à changer à proximité du collecteur, de telle sorte que les particules qui suivent les lignes de courant vont être déviées et interceptées alors que les lignes de courant changent de direction pour contourner le collecteur. Les particules vont être bloquées dans une zone de volume mort (Figure 1.4). Ce type de capture est improbable pour les petites particules capables de se déformer avec les lignes de courant et de ce fait se comporter comme des traceurs.
- **Déposition due aux forces électrostatiques** : les collecteurs et les particules en suspension peuvent être chargés électriquement. Ces charges sont la somme d’interactions multiples présentées par la suite dans la théorie D.L.V.O (initiales des auteurs d’articles célèbres, l’un de Derjaguin et de Landau, 1941 et l’autre de Verwey et d’Overbeek, 1948). Les interactions peuvent être répulsives dans le cas d’une charge identique des particules et des collecteurs ou bien attractives pour des charges opposées, induisant une rétention des particules en suspension dans le cas des interactions attractives. Les forces électrosta-

tiques déterminent si les associations (particules fines-milieu poreux) sont favorables ou non à la rétention.

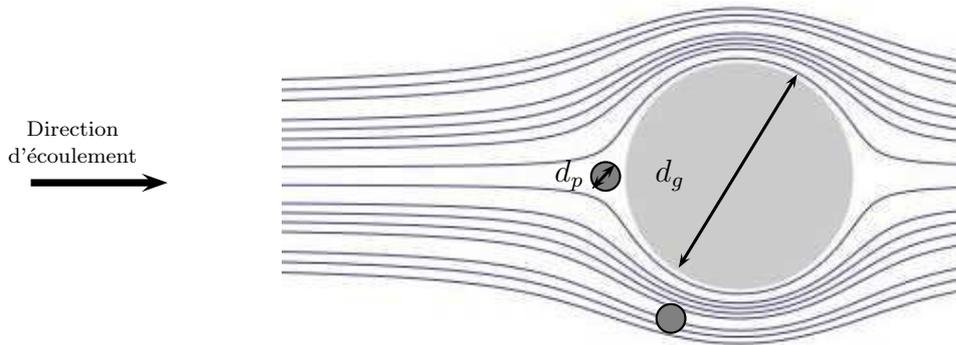


Figure 1.4 – Blocage d'une particule dans un volume mort (Tien, 1989) (cité dans Ghidaglia, 1994).

Processus de décolmatage (réentraînement des particules)

Il est nécessaire de distinguer le décolmatage dû à un réentraînement spontané de particules dans le fluide par des conditions expérimentales constantes (*i.e.* débit ou pression) et un décolmatage provoqué essentiellement par un changement de débit ou de sens d'écoulement effectué par l'expérimentateur.

- Le décolmatage spontané intervient dans le cas de réentraînement de particules du collecteur ou bien du site de rétention vers le fluide. Cela peut se produire dans le cas d'un choc de particules en mouvement contre des particules immobiles. Le type de site de rétention ainsi que les forces d'interactions entre une particule attachée et le collecteur sont importants. Il est très plausible que sur un site de rétention en surface les particules soient plus facilement réentraînées que sur un site de crevasse ou un site de restreint ;
- Le décolmatage provoqué peut subvenir dans le cas d'une augmentation brutale de débit ou de la pression du fluide, ou bien alors en inversant le sens de l'écoulement. Ainsi les grosses particules bloquées dans des sites de restreints peuvent être réentraînées.

Herzig et Goff (1972a) dans leur étude de colmatage-décolmatage dans des milieux en billes de verre ($469\mu\text{m}$) et en injectant différentes tailles de particules fines ($(1-32)\mu\text{m}$), utilisent les deux moyens de réentraînement spontané et provoqué. Le décolmatage spontané est réalisé en gardant le même débit et en remplaçant les particules par un liquide propre. Durant tous les essais, aucun décolmatage spontané n'a été observé. Alors que pour un décolmatage provoqué par un changement brutal de débit, il a été noté que les grosses particules sont moins sensibles

aux changements brutaux de débits pendant que les petites particules sont réentraînées. Ce type de décolmatage se produit d'une manière instantanée après le changement de débit et se stabilise ensuite (même si on doit répéter la même opération, cela ne sera efficace que la première fois). Les tests pour le décolmatage en inversant le sens de l'écoulement donnent des réentraînements différents selon la taille des particules fines. Le décolmatage sera beaucoup plus efficace pour les grosses particules même à faible débit.

1.2.4 Forces exercées lors de la filtration

La complexité du phénomène de filtration est essentiellement due à la présence de toutes les forces qui peuvent intervenir et aux mécanismes mis en jeu. Dans ce paragraphe, nous allons détailler les forces appliquées sur une particule en mouvement. [Herzig *et al.* \(1970\)](#) et [Gohr Pinheiro *et al.* \(1999\)](#) distinguent selon la taille des particules qui circulent, les forces hydrodynamiques et les forces physico-chimiques qui dominent.

Les forces hydrodynamiques et mécaniques

Le comportement des particules de l'ordre de quelques microns est principalement contrôlé par les forces hydrodynamiques qui sont :

- La force gravitationnelle, fonction de la taille et de la densité des particules. Dans le cas des particules très denses, les effets de la gravité ne peuvent pas être négligés. Une particule en suspension est donc soumise à un vecteur force de gravité F_G proportionnel à la taille de la particule et à la différence de densité entre la particule et le fluide.

$$F_G = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \quad (1.3)$$

- La force de traînée, qui dans le cas simple d'un fluide newtonien et d'un écoulement laminaire à faible nombre de Reynolds, s'écrit :

$$F_T = K_a \cdot \mu \cdot v \quad (1.4)$$

avec v la vitesse du fluide supposée uniforme loin de la particule, K_a un coefficient qui dépend de la taille et de la forme des particules en suspension ($K_a = 3 \cdot \pi \cdot d_p$), d_p le diamètre d'une particule sphérique.

- Les forces d'inertie liées à un effet transitoire (dv/dt), elles sont données par l'équation suivante :

$$F_i = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \cdot \rho_p \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1.5)$$

- La force de lubrification est due à la résistance visqueuse du film de fluide qui glisse entre la particule et la surface solide du milieu poreux. Elle est donnée par l'équation :

$$F_l = 6 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \left(1 + \frac{d_p}{2 \cdot h}\right) \cdot \frac{d_p}{2} \cdot v \quad (1.6)$$

avec h la distance entre les deux surfaces solides.

Forces physico-chimiques

- Les forces de van der Waals sont des forces d'attraction entre particules et la surface poreuse. Ce sont des forces d'attraction de courte distance (de l'ordre de quelques centaines d'Angströms). Dans le cas où on approxime la particule par une sphère et la surface poreuse par un plan, la force de van der Waals peut être décrite par la formule :

$$F_{vdw} = \frac{-H \cdot d_p}{12 \cdot \delta^2} \quad (1.7)$$

avec δ la distance particule-surface solide du milieu poreux, H est la constante de Hamaker caractéristique des surfaces, elle est de l'ordre de 10^{-19} J ([Ghidaglia, 1994](#)).

- Les forces électrostatiques caractérisent différents types d'interactions qui créent une barrière énergétique. [Ghidaglia \(1994\)](#) distingue cinq types d'interactions en fonction des charges appliquées :
 - a) Lorsque la particule et le collecteur sont simultanément chargés, les forces coulombiennes d'attraction ou de répulsion interviennent ;
 - b) Les collecteurs chargés créent une charge de surface de signe opposé sur les particules qui subissent une force résultante ;
 - c) Les particules chargées de même signe subissent des forces répulsives : c'est l'effet de charge d'espace ;
 - d) Si le collecteur ou la particule est uniquement chargé(e), il se crée une charge électrostatique sur les surfaces non chargées ;
 - e) Dans le cas des électrolytes, les particules chargées immergées dans le fluide adsorbent des ions et par compensation, une seconde couche plus riche en ions de charge opposée se forme. La différence de potentiel entre l'électrolyte et la couche liée au solide est appelée potentiel zêta. Ce potentiel caractérise les effets électrocinétiques entre particules et lit filtrant. Le potentiel zêta dépend du pH, de la force ionique, de la solution et de la nature des particules et des ions. En présence d'une barrière énergétique liée à la répulsion électrostatique entre surfaces, seule une partie des collisions engendrera une rétention. Si cette barrière énergétique répulsive est absente, chaque collision donnera lieu à une fixation des particules sur la paroi.

- Les forces chimiques de surface, se forment entre particules colloïdales et autres particules. L'efficacité de collision entre une colloïde et une paroi est largement contrôlée par la chimie des surfaces.
- Les forces dues aux mouvements browniens se créent dans les particules de taille inférieure au micron.

1.2.5 Types de filtration en profondeur

Différentes forces interviennent suivant le diamètre caractéristique d_p des particules en suspension, pour ainsi classer la filtration en profondeur suivant trois catégories possibles :

- La filtration mécanique : les forces mécaniques et hydrodynamiques, pour les grosses particules $d_p > 30\mu\text{m}$ suivant [Herzig *et al.* \(1970\)](#) et de diamètre $d_p > 10\mu\text{m}$ pour [Gohr Pinheiro *et al.* \(1999\)](#) et [Ghidaglia \(1994\)](#) ;
- La filtration physico-chimique (ultra-filtration) : les forces physico-chimiques dominent pour les petites particules de diamètre $d_p < 1\mu\text{m}$ suivant [Herzig *et al.* \(1970\)](#) et de diamètre $d_p < 0,1\mu\text{m}$ pour [Gohr Pinheiro *et al.* \(1999\)](#) et [Ghidaglia \(1994\)](#) ;
- La micro-filtration : toutes les forces interviennent si nous avons des tailles de particules entre les deux limites, $0,1 \leq d_p \leq 10\mu\text{m}$ et $3 \leq d_p \leq 30\mu\text{m}$ ([Herzig *et al.*, 1970](#)).
- La filtration colloïdale : les forces de surfaces interviennent pour les particules de diamètre ($d_p < 0,1\mu\text{m}$).

On distingue alors essentiellement deux grands types de filtration en profondeur : la filtration mécanique pour les grosses particules et la filtration physico-chimique pour les particules fines ([Nadji, 1998](#)).

Filtration mécanique pour les grosses particules

Les grosses particules $d_p > 10\mu\text{m}$ suivent les lignes de courant et peuvent être arrêtées dans les différents sites de rétention (Figure 1.2). Il en résulte un dépôt de particules qui peut arrêter ou bien dévier l'écoulement. [Delanchambre \(1966\)](#); [Herzig *et al.* \(1970\)](#) et [Ghidaglia \(1994\)](#) ont défini un facteur géométrique critique θ qui détermine cette filtration mécanique. Il s'agit du rapport entre le diamètre des particules que l'on filtre et le diamètre de la particule du milieu, soit $\theta = d_p/D_m$ (avec D_m le diamètre du collecteur qui est associé à d_g diamètre des grains et d_p le diamètre d'une particule en suspension). Pour cela, les auteurs ont pris un empilement compact de sphères de même diamètre D_m , de manière à obtenir le plus petit pore lorsque trois sphères sont en contact (Figure 1.5). Soit d_p la plus grosse particule capable de traverser l'interstice.

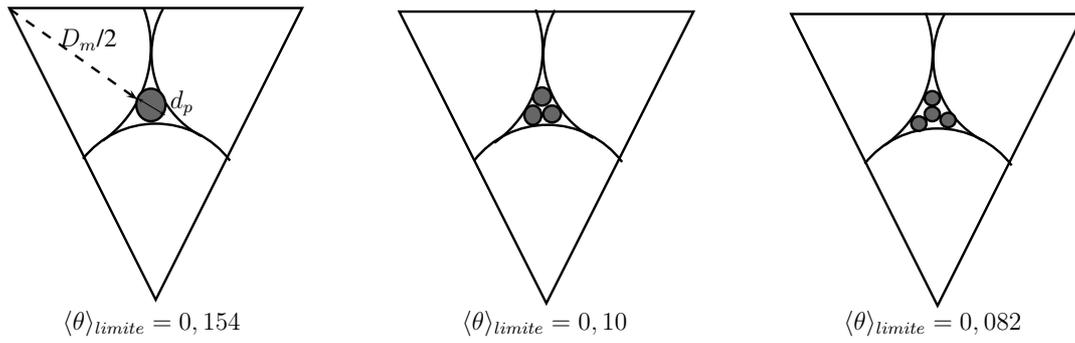


Figure 1.5 – Différentes configurations de blocages associées à $\theta = d_p/D_m$.

Ghidaglia (1994) montre que dans le cas d'une capture uniquement géométrique, $\theta = 0,154$ est le rapport seuil à partir duquel les particules seront bloquées. La figure 1.5 présente le seuil des différentes configurations de blocage. Il est possible d'imaginer la filtration de plusieurs particules simultanément dans ce cas pour trois particules la limite est de $\theta = 0,1$ et pour quatre particules $\theta = 0,082$.

Delanchambre (1966) trouve que si on dépasse la limite $\theta > 0,154$, le colmatage est irréversible et il y aura formation de cake dans le filtre, par contre pour $\theta < 0,065$ la rétention est négligeable et les particules peuvent circuler. Pour des valeurs intermédiaires, un blocage partiel du milieu poreux peut se produire (cela dépend de la porosité du lit filtrant et de la forme des grains en suspension). Cependant, des études plus récentes estiment que cette limite de $\theta < 0,065$ sous-évalue l'effet de la taille de la particule très fine. Bradford *et al.* (2002, 2003) démontrent pour des essais d'injection de colloïdes dans différents milieux constitués de sables et de billes de verre qu'un blocage peut se produire pour une valeur de θ aussi faible que 0,002.

Par ailleurs pour les grosses particules, le colmatage des pores se fait en plusieurs étapes, Herzig et Goff (1972b) mettent en évidence d'abord l'occupation des sites de crevasse, ensuite vient l'occupation des sites de restreint suivi par l'occupation des sites de caverne.

Filtration physico-chimique pour les petites particules

Les particules de l'ordre du micron avec un facteur de ($\theta < 0,01$) sont sensibles aux forces de van der Waals et de diffusion brownienne. Dans ce cas, le mécanisme de colmatage est différent et ce sont les sites de surface qui interviennent en premier.

Filtration colloïdale de surface

Le comportement des particules colloïdales ($d_p < 0,1\mu\text{m}$ et dotées d'une grande surface spécifique) oblige à considérer les propriétés des surfaces du collecteur-colloïde. En effet la stabilité et la dispersion des particules sont régies par les interactions établies entre les particules

colloïdales et entre colloïde-collecteur par les forces particulièrement dominantes à cette échelle (forces électrostatique et force de van der Waals). La résultante des forces colloïdales a été introduite dans un modèle électrostatique appelé la théorie D.L.V.O. Celle-ci propose d'étudier la stabilité des particules colloïdales à partir de l'équilibre entre les forces attractives et les forces répulsives qui s'exercent sur les colloïdes. L'énergie totale V_T est décrite comme étant la somme d'un terme d'énergie attractive V_A , résultant des forces de van der Waals et d'un terme d'énergie associé aux forces répulsives de la double couche électrique V_R , tel que

$$V_T = V_A + V_R \quad (1.8)$$

- Attraction de van der Waals : définie auparavant par la force de van der Waals (V_{VDW}); très puissante à faible distance, elle est une force attractive d'origine électromagnétique.
- Répulsion électrostatique de la double couche électrique : lors d'un contact entre un colloïde et une surface (interaction plan-sphère) ou entre les colloïdes (interaction sphère-sphère), le recouvrement des couches diffuses conduit à une répulsion électrostatique entre les deux solides (V_{DC}) .

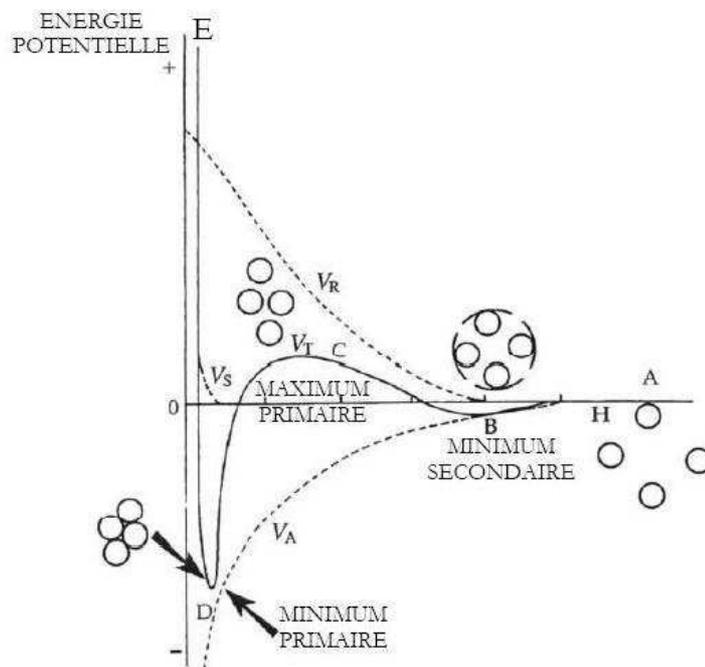


Figure 1.6 – Diagramme d'énergie potentielle en fonction de la distance interparticulaire H.

La figure 1.6 présente le profil des courbes donnant l'énergie d'interaction totale V_T en fonction de la distance interparticulaire H. Le profil de l'énergie d'interaction totale V_T passe

par plusieurs zones, le passage par le maximum primaire constitue une barrière énergétique s'opposant à l'agglomération des particules, tandis que la valeur du minimum de cette barrière peut faire flocculer les particules. A partir de l'allure de l'énergie d'interaction totale V_T , nous distinguons cinq zones :

- Zone A : Lorsque la distance entre les particules est grande ($H > 100$ nm), les énergies de van der Waals et de la double couche électrique n'ont pas d'effet sur la collision des particules.
- Zone B : Lorsque les particules se rapprochent d'environ 60 nm, les deux potentiels V_A et V_R augmentent. Cependant, le terme V_R croît plus lentement que V_A . Il y a donc une légère domination des forces attractives et l'existence d'un petit minimum secondaire.
- Zone C : Lorsque la distance interparticulaire diminue encore plus (environ 20 nm), les forces répulsives de plus en plus fortes ont pour résultat l'existence d'une large barrière d'énergie qui empêche l'approche des particules et donc l'agglomération.
- Zone D : Ceci est valable jusqu'à ce que la distance interparticulaire soit inférieure à une certaine distance où les forces attractives de van der Waals deviennent dominantes par rapport aux forces répulsives de la double couche chimique, il en résulte la formation d'agrégats forts et irréversibles. On observe alors un puits de potentiel (minimum primaire) plus ou moins profond expliquant que lorsque les particules sont en contact, il devient très difficile de les redisperser.
- Zone E : Lorsque la distance entre les particules est nulle, on observe que l'énergie potentielle est alors infinie car pour des distances interparticulaires très petites (en dessous du nanomètre) l'énergie de van der Waals est très violemment répulsive; c'est ce que l'on appelle l'énergie de Born correspondant à la répulsion lors de l'interpénétration des nuages électroniques des surfaces à très faibles distances (0,1 à 0,2 nm).

On se rend effectivement compte que pendant un écoulement, lorsque deux particules rentrent en collision, si leur énergie cinétique intrinsèque est supérieure à la barrière d'énergie d'agrégation, le choc aura pour résultat l'agrégation des particules dans le minimum primaire (zone D). Au contraire, si les particules ne possèdent pas une énergie cinétique suffisante pour dépasser la barrière énergétique, alors la dispersion se trouve dans le minimum secondaire (zone B). Dans ce cas, les agrégats formés sont facilement redispersables en changeant les conditions de transport.

Le tableau 1.1, résume les différents événements pouvant se produire lorsqu'une particule en suspension de diamètre déterminé traverse un milieu poreux : les forces impliquant le dépôt dans les différents types de sites de rétention susceptible de rencontrer et enfin les modes de réentraînement pouvant intervenir .

Table 1.1 – Mécanismes de capture et site de rétention pour chaque type de filtration profonde.

type de filtration	taille de particules	sites de rétention	forces possibles	mécanismes de capture	décolmatage possible
Mécanique	$\geq 30\mu\text{m}$	constriction, crevasse, caverne	gravité, pression du fluide	sédimentation, interception directe	inversement de la direction du fluide
Physico-chimique	$\sim 1\mu\text{m}$, ($< 3\mu\text{m}$)	sites de surface	van der Walls, électrocinétique	interception directe	augmentation du débit
Colloïdale	($< 0, 1\mu\text{m}$)	sites de surface	van der Walls, électrocinétique, liaison chimique surfacique	interception directe, diffusion	augmentation du débit

1.3 Synthèses des travaux précédents : transport des particules

1.3.1 Introduction

Comme cela a déjà été mentionné auparavant, les recherches dans le domaine du transport et du dépôt des particules sont extrêmement riches et abondantes; nous trouvons des publications diverses qui traitent le problème d'une manière assez générale (Herzig *et al.*, 1970; McDowell-Boyer *et al.*, 1986; Ryan et Elimelech, 1996; Kretzschmar et Sticher, 1998) et plus récemment (Zamani et Maini, 2009); que ce soit à travers des expériences au laboratoire pour différentes conditions d'essais (Herzig et Goff, 1972b,a; Kretzschmar *et al.*, 1997; Gohr Pinheiro *et al.*, 1999; Compère *et al.*, 2000; Benamar *et al.*, 2007; Ruiz, 2009), ou bien par la modélisation du phénomène (Rege et Fogler, 1988; Saiers et Hornberger, 1994; Bradford *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2006; Kim et Whittle, 2006). Certaines publications s'intéressent à des types particuliers de colloïdes naturels comme des oxydes d'aluminium en suspension pour Moghadasi *et al.* (2004), ou de la kaolinite pour Reddi *et al.* (2000) ou bien biologiques comme des bactéries (Kim et Corapcioglu, 1997), ou bien alors des colloïdes modèles en latex (Kretzschmar *et al.*, 1997; Ruiz, 2009, par exemple). Cela dans des milieux poreux modèles en bille de verre (Ghidaglia, 1994), ou bien dans du sable (Alem *et al.*, 2009). D'autres travaux traitent des mécanismes de blocage dans différents sites de rétention (Delanchambre, 1966); ou bien suivant le rapport $\langle \theta \rangle$ entre la taille des particules en suspension et la taille de particules qui constituent le milieu dont dépend les mécanismes de filtration, comme par exemple le straining (Xu *et al.*, 2006). Dans cette partie, on s'intéresse uniquement aux revues qui traitent le transport et le dépôt par le biais d'essais expérimentaux (Tableau 1.2) et aux paramètres qui influencent le transport des particules en suspension dans des colonnes d'essais. La partie modélisation sera traitée dans un chapitre ultérieur.

Table 1.2 – Paramètres des essais de filtration pour quelques travaux de recherches.

informations auteurs	milieu poreux	Hauteur x diamètre [cm ²]	porosité initiale[%]	perméabilité [m/s]	particules fines	d _p [μm]	concentration [g/l]	débit [ml/mn]
(Moghadasi <i>et al.</i> , 2004)	bille de verre 480 μm	58 x 3,2	38	1,6·10 ⁻³	oxyde d'aluminium	7-16	0,5 ; 1 ; 2	12,5-200
(Baghdikian <i>et al.</i> , 1989)	sable ottawa	32,2 x 6,3	37,5	7,6·10 ⁻⁵	argile kaolinite, bentonite	< 1	0,2-4	5,4- 21,6
(Todd <i>et al.</i> , 1984)	grés	7,62 x 2,54	15,9 ; 19,8	(0,53-1,9)·10 ⁻⁵	oxyde d'aluminium	0,1-10	5 · 10 ⁻³	108
(Reddi <i>et al.</i> , 2000)	sable (50-150)μm	6,4 x 7,6	-	3-4 · 10 ⁻⁴	argile : kaolinite ; polystyrene	2, 64 ; 7, 16	0,5 ; 1 ; 2,5 g/l	50-100
(Kretzschmar <i>et al.</i> , 1997)	1 : bille de verre (300-400)μm	32 x 2,4	39	-	latex	0,2	0,003 (pulse) ; 5 · 10 ⁻⁴ (en continue)	2,8
	2 : sable roulé (0,2 ; 0,63)mm	45 x 1 ; 6 x 1	50	-	latex carboxyl	0,11	6,3 · 10 ⁻³ (pulse) 6,3 · 10 ⁻⁴ (en continue)	1
	3 : Calcaire	45 x 1 ; 10 x 2,5	46	-	latex carboxyl	0,11	-	0,05 ; 0,98
	4 : sable roulé (0,2 ; 0,63)mm	45 x1 ; 10x2,5	50	-	colloïdes : oxyde de fer	0,12	0,03 hématite et 10 ⁻³ charbon organique	0,05 ; 1
	(Benamar <i>et al.</i> , 2007)	gravier ; billes de verre	8,9 x 35,5	47 ; 42	23·10 ⁻³ ; 21·10 ⁻³	limon	14	0,1
(Compère <i>et al.</i> , 2000)	sable 100μm	7 x2,2	41	-	argile : smectite	< 1	0,25	0,52
(Herzig et Goff, 1972a)	bille de verre (469μm)	100x2	38,5	-	microbilles de verre	20	7,5-15*	7,5-15
	bille de verre (469μm)	100x2	38,5	-	silice	4,6	2-4*	9,42 -15
	bille de verre (845μm)	100x2	40	-	alumine	1	0,95*	16,96-50,89
(Alem <i>et al.</i> , 2009)	sable	40 x 4,1	36	6,5·10 ⁻⁴	argile : kaolinite	0-45	2	25-95
(Delanchambre, 1966)	cylindre, sphère en verre	7 x 4,6	45 ; 38,5	-	polystyrène sulfoné	60-350 60-350	0,05·10 ⁻² -0,4·10 ⁻² [-]	-
(Ghidaglia, 1994)	bille de verre (3-6)mm	50x10x3,9	27 ; 39	-	billes sphériques résine acrylique	575-870	1 particule ; paquet de particule	397
	(Bradford <i>et al.</i> , 2002)	sable ottawa bille de verre	10x5	35± 1	- 36,9± 0,5	latex	0,45 ; 1 ; 2 ; 3,2	42,4 ; 3,86 * ¹ 0,485 ; 0,118* ¹

*10⁴.titre volumique ; *¹10¹⁰ particules/l

1.3.2 Transport des particules : les paramètres importants

Les expériences réalisées dans des colonnes en laboratoire sur le transport de particules ont été menées pour différentes particules (*e.g.* argileuses, latex, métaux lourds). Dans la plupart des expériences, la concentration de la solution injectée est constante et la solution à la sortie de la colonne est analysée essentiellement par turbidimètre afin d'avoir les courbes de percée. Les particules retenues dans le milieu sont généralement l'objet de l'étude, le piégeage peut être fonction de quelques paramètres importants : (i). les paramètres mécaniques (*e.g.* taille et forme des particules, débit); (ii). les paramètres physico-chimiques (*e.g.* force ionique, pH, propriétés des surfaces colloïdes-milieu poreux); (iii). d'autres paramètres telles que la concentration des particules ou la longueur du milieu poreux peuvent constituer des facteurs importants.

Influence de la vitesse d'écoulement

Un grand nombre d'études concernant l'influence du débit sur le transport colloïdale ont été réalisées en milieu poreux homogène. Les tests précédents d'[Alem *et al.* \(2009\)](#); [Compère *et al.* \(2000\)](#); [Reddi *et al.* \(2000\)](#) montrent qu'une faible vitesse entraîne une augmentation de la rétention des particules, provoquant ainsi des réductions plus importantes de l'espace poral et donc un colmatage plus conséquent. Pour des débits importants, le transport et le dépôt de particules se feront plus en profondeur. Cela indique que pour de faibles débits le dépôt se fait très rapidement en entrée du filtre, alors que pour des débits importants le dépôt sera réparti le long de la colonne, ainsi les réductions de l'espace poreux dans toute une colonne sont moins importantes. Cependant, il reste très difficile de déterminer l'emplacement exact du dépôt d'une particule par rapport au débit. Dans le cas d'un faible débit, les forces hydrodynamiques vont diminuer par rapport aux forces de nature physico-chimiques, les forces de van der Waals ainsi que les forces électrostatiques vont rentrer en jeu, modifiant ainsi les mécanismes de capture.

Influence de la concentration des particules

Selon les études précédentes, plus la concentration des particules est élevée plus les taux de dépôts sont importants. Une concentration élevée engendre un dépôt important, de telle sorte que les particules qui sont entraînées vers des pores vont former des ponts plus rapidement et ainsi engorger les pores. [Moghadas *et al.* \(2004\)](#) dans leur étude ont introduit des particules fines de $7\mu\text{m}$ dans un milieu en billes de verre pour différentes concentrations 500, 1000, 2000ppm. La figure [1.7a](#) montre les résultats des perméabilités qui diminuent avec le temps pour les différentes concentrations. En augmentant la concentration de particules solides dans l'injection de fluide, la capture et donc le colmatage se produisent plus rapidement, et par conséquent, le rapport de perméabilité diminue plus rapidement. Par ailleurs, nous remarquons

qu'une chute de perméabilité est beaucoup plus importante en passant d'une concentration de 500 à 1000 ppm en comparaison au passage d'une concentration de 1000 à 2000ppm. En parallèle, nous citons les travaux de Reddi *et al.* (2000) (Figure 1.7b), les auteurs injectent dans des colonnes de sables, des particules de différentes tailles pour différentes concentrations (0,5-1)g/l (Tableau 1.2). Nous remarquons que les particules de taille plus grande avec une concentration de 0,1g/l vont subir une diminution de la perméabilité plus importante. Pour les mêmes particules avec les concentrations de 0,5 et 1g/l, nous remarquons évidemment que la chute de perméabilité dépend de la concentration la plus élevée mais aussi que la chute de perméabilité est différente entre les petites et les grosses particules. Cela veut dire que la taille des particules est importante, de tel sorte que le dépôt en surface va être prépondérant pour les petites particules, alors que la formation de pont à l'entrée des pores sera la cause principale du colmatage des pores pour les grosses particules.

Par ailleurs, Ghidaglia (1994) compare dans son étude le transport d'une particule et le transport d'un paquet de particules. Il en déduit que l'augmentation du nombre de particules pouvait augmenter la profondeur d'investigation dans le milieu. Les résultats montrent que les particules indépendantes les unes des autres pénètrent plus en profondeur quand elles sont à plusieurs par effet hydrodynamique. De telle manière que par collision entre elles, une particule piégée peut être relarguée.

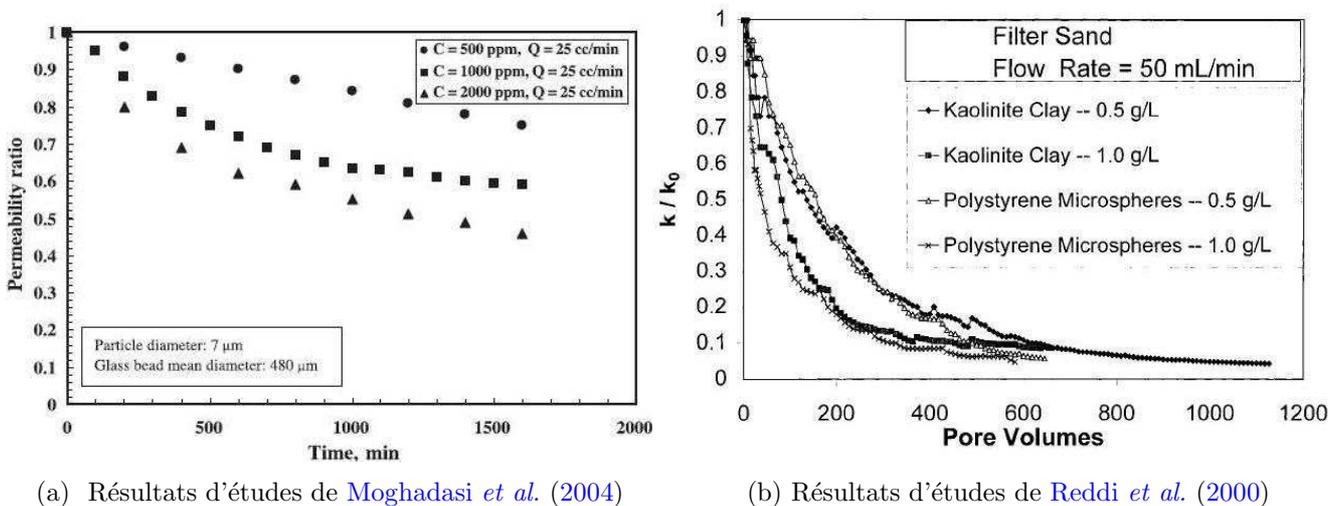


Figure 1.7 – Effet de la concentration des particules sur la chute de la perméabilité.

Influence du diamètre des colloïdes sur la rétention

La taille des colloïdes est un paramètre important pour déterminer le type de phénomène de capture. Nous avons vu dans la précédente partie que selon cette taille, nous pouvons avoir

un mécanisme de capture physico-chimique dans des sites de surfaces, ou bien une capture mécanique dans des sites de restreints, lorsque la taille de la particule est plus grande que la taille du pore. [Delanchambre \(1966\)](#) et [Herzig *et al.* \(1970\)](#) estiment qu'il faut un rapport de $\theta > 0,065$ pour avoir un piégeage des colloïdes.

Une étude menée par [Todd *et al.* \(1984\)](#) (cité dans [Gao, 2007](#)) montre que les plus grosses particules vont causer le plus de dégâts. Les grosses particules ont plus tendance à s'installer et à bloquer l'entrée des pores par la formation de ponts causant ainsi plusieurs dommages sur l'orientation des écoulements. Dans cette étude, [Todd *et al.* \(1984\)](#) réalisent des essais d'injection de colloïdes de différentes tailles dans une colonne où la pression est mesurée dans différentes sections. En faisant le suivi de la pression, ils comparent la chute de la perméabilité dans les différentes sections. Les résultats montrent que pour les petites particules de 0,1 à 3 μm , la première section a perdu environ 50 % de sa perméabilité d'origine et la dernière section 20 %. Alors que pour les grosses particules de 8 à 10 μm , la première section a perdu environ 90 % de sa perméabilité d'origine et la dernière section seulement 5 %. En d'autres termes, dans les premières couches de la colonne, les grosses particules ont une plus forte tendance à bloquer les pores mais les dommages causés par les chutes de perméabilités restent peu profonds dans la colonne.

Influence du pH et de la force ionique

Le pH et la force ionique vont influencer la barrière d'énergie potentielle (théorie D.L.V.O) en affectant les forces répulsives de la double couche. Les forces attractives de van der Waals sont indépendantes des changements chimiques de la solution. Les particules fines déposées par attraction des forces de surfaces peuvent être relarguées en modifiant le pH, la force ionique ou bien la concentration de certaines espèces aqueuses qui vont altérer la charge de surface (*e.g.* colloïdes, grains collecteurs).

[Baghdikian *et al.* \(1989\)](#) font varier le pH de 2,5 à 10 ; les tests révèlent une diminution de la rétention quand le pH augmente, mais cela n'est pas tellement significatif. Les recherches sur l'effet de la force ionique sont effectuées par addition de sels, communément le NaCl ou le KCl dans le fluide injecté. Les chutes des perméabilités sont beaucoup plus importantes quand les sels sont ajoutés dans la solution. Une augmentation de la rétention (chute rapide de la perméabilité) est proportionnelle à une augmentation de la force ionique en conditions répulsives pour des surfaces colloïde-collecteur de même signe. Dans ce cas, l'augmentation de la force ionique par ajout de sel va faire diminuer l'épaisseur de la double couche, les particules entrent davantage en collision et augmentent ainsi l'attraction. Dans le cas de surfaces de charges opposées, les conditions attractives sont présentes et une augmentation de la force ionique entraîne une diminution de la rétention.

Influence des conditions d'essais

Les recherches sur le transport des particules fines dans des milieux modèles sont réalisées dans des colonnes en laboratoire. Les dimensions des colonnes sont assez variables (Tableau 1.2) ; les colonnes peuvent être placées d'une manière horizontale (Benamar *et al.*, 2007; Reddi *et al.*, 2000), ou bien d'une manière verticale (Alem *et al.*, 2009; Compère *et al.*, 2000). Le transport de particules peut se faire dans un milieu complètement saturé ou bien partiellement saturé. Les particules peuvent être injectées d'une manière continue à débit constant (Moghadasi *et al.*, 2004; Alem *et al.*, 2009; Herzig et Goff, 1972a), ou bien par injection de petite quantité par de courtes impulsions (Kretzschmar *et al.*, 1997; Compère *et al.*, 2000; Benamar *et al.*, 2007).

Kretzschmar *et al.* (1997) réalisent des essais d'injection dans un milieu granulaire, dans des colonnes de dimensions variables, la longueur est variable entre (6-45)cm et le diamètre est considéré entre (1-2,5)cm. Ils démontrent clairement que dans le cas d'une injection de courte pulsation (injection instantanée), les dimensions de la colonne n'influencent pas le dépôt des particules colloïdales en latex et en oxyde de fer. Ceci permet d'adapter les dimensions de la colonne afin d'élargir les mesures du coefficient de dépôt selon les paramètres à tester.

Influence des milieux poreux

Quelques recherches sont faites sur la différence de forme des particules qui constituent le milieu. Des expériences en colonne dans les mêmes conditions hydrauliques et chimiques sont réalisées avec la seule différence la forme du milieu (*e.g.* billes de verre, sables, graviers). En maintenant la même porosité, Benamar *et al.* (2007) utilisent deux milieux poreux saturés (gravier siliceux et billes de verre). Les courbes de restitution des particules montrent un taux plus important dans le milieu constitué de billes de verre, ce qui met en évidence l'importance de la structure porale dans la rétention des particules.

Dans le même principe, Auset et Keller (2006) réalisent des expériences dans des micro-modèles transparents afin de comprendre la rétention de colloïde pour différents paramètres : tailles de particules, rugosité de surface des grains, force ionique de la solution et les débits. Ils ont observé le dépôt de colloïdes à l'échelle du pore pour des surfaces lisses et des surfaces rugueuses. Les colloïdes déposés dans le micromodèle lisse se situent en amont du grain (Figure 1.8-cas a). Par contre, les colloïdes déposés dans le micromodèle rugueux sont plus nombreux et se déposent autour du grain (Figure 1.8-cas b) dans des sites de rétention créés par les aspérités de la surface rugueuse. Cet aspect de rugosité de la surface peut être un facteur très important que les études jusqu'à présent n'ont pas intégré dans la détermination de l'efficacité de collision dans un collecteur. Auset et Keller (2006) proposent d'inclure un facteur de forme des grains dans le calcul de l'efficacité du collecteur. La forme des colloïdes peut elle aussi jouer un rôle

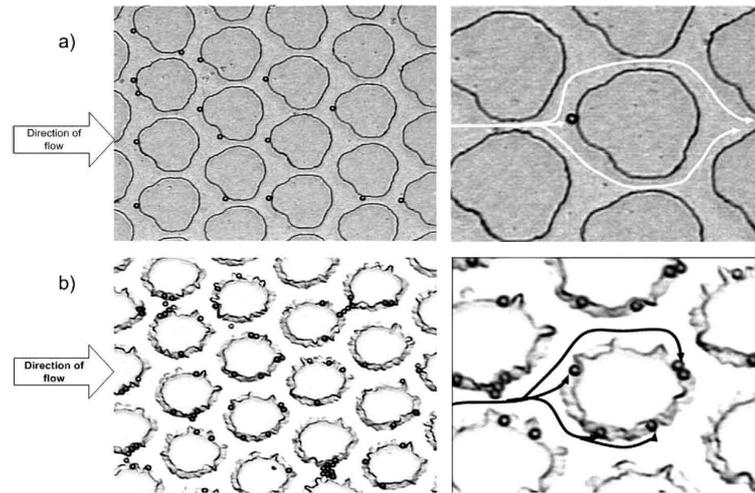


Figure 1.8 – Images du dépôt de colloïdes dans les micromodèles : a- micromodèle lisse ; b- micromodèle rugueux (les lignes de courant sont dessinées à la main pour montrer le chemin suivi par les colloïdes) (Auset et Keller, 2006).

dans l'interception dans des sites de rétention formés par les aspérités. Un nombre considérable d'études ont été réalisées afin de voir l'influence de chaque paramètre sur le dépôt de particules fines. Cependant, la plupart des études ont été menées dans des milieux modèles constitués de billes de verre avec des surfaces uniformes et lisses ; en injectant des colloïdes de formes sphériques. Il peut y avoir des différences significatives entre les relations empiriques du dépôt issues de modèles poreux simplifiés et les observations du dépôt pour des milieux constitués du sol rugueux.

1.4 Démarche adoptée pour l'orientation des recherches

Le transport et le dépôt de particules en suspension dans un milieu poreux ont été l'objet de recherches considérables, pour un éventail de direction de recherches très large que ce soit expérimentalement dans des colonnes ou bien par la modélisation du phénomène. Chaque axe de recherche aborde une problématique du phénomène de filtration, par le biais des conditions physico-chimiques, des conditions hydrodynamiques, ou bien par l'étude des types de sites de rétention rencontrés avec les mécanismes de blocage (pour les différentes tailles de particules fines) et tout cela dans différents milieux poreux étudiés.

La synthèse bibliographique a permis de montrer seulement une partie des expériences que l'on peut trouver dans la littérature. Les variations des conditions expérimentales sont extrêmement larges et nous avons été confrontés aux différents paramètres. Il paraît difficile de réunir l'ensemble des phénomènes intervenant lors de la filtration en profondeur, cela est d'autant plus difficile pour des matériaux naturels non uniformes. Les avancées des différents travaux antérieurs nous aident à mieux orienter nos recherches et à nous focaliser sur des paramètres qui ont été relativement peu exploités dans le cas des milieux poreux naturels. Les recherches effectuées font apparaître que les essais d'injection-filtration ont souvent été réalisés dans des colonnes de petites dimensions. Le dépôt dû aux conditions d'essais chimiques (pH, force ionique) a été largement étudié et bien expliqué dans les précédents travaux. Les phénomènes de surfaces dont découle la théorie D.L.V.O ont été bien exploités. De même, l'influence des variations de la concentration sur le dépôt des particules de différentes tailles est assez bien connue.

Néanmoins, malgré la richesse de ces essais, l'effet de l'hétérogénéité physique du milieu par le changement de la matrice poreuse, la rugosité de la surface d'un grain-collecteur restent assez mal décrits dans des milieux poreux modèles comme des billes en verre. Par ailleurs, l'influence de la vitesse d'écoulement est un paramètre prépondérant dans le mécanisme de capture d'une particule, cela est d'autant plus important dans un milieu hétérogène. C'est donc dans cette direction que nous orienterons nos recherches, en faisant varier pour chaque essai le milieu poreux et en regardant l'évolution de la perméabilité.

1.4.1 Choix des matériaux

Dans le cadre de nos travaux, le choix du milieu poreux est déterminant afin de reproduire des milieux hétérogènes. Le matériau doit être accessible afin de réaliser suffisamment d'essais et il doit aussi être représentatif du sol naturel que nous pouvons trouver dans les aquifères. Notre choix s'est porté sur un sable de construction d'une large granulométrie, de forme légèrement allongée et de surface un peu rugueuse. Pour les particules fines, afin de rester dans le cas

d'un milieu naturel nous avons choisi des particules argileuses non gonflantes (kaolinite P300). Pour ne garder que l'aspect du dépôt en filtration profonde, dans un milieu hétérogène, la concentration sera constante durant tous les essais et fixée à 0,5 g/l. Les particules argileuses seront transportées dans le filtre et déposées à différentes profondeurs dans le milieu poreux. Nos expériences se situent alors dans le domaine de la filtration en profondeur.

1.4.2 Choix de la méthode expérimentale

L'objectif de la thèse est d'enrichir les expériences sur le transport et le dépôt de particules naturelles dans des milieux de sol naturels non homogènes. En injectant des particules argileuses, nous regardons les profils de dépôt et cela pour différentes conditions hydrauliques. Le suivi de la matrice poreuse sera effectué le long de la colonne et durant tout un essai par des moyens non destructifs. Le chapitre suivant présente le dispositif expérimental, les conditions des expériences ainsi que les propriétés des matériaux utilisés.

Chapitre 2

Présentation des expériences : matériaux, méthodes et dispositif expérimental

Sommaire

2.1	Position du problème	32
2.2	Dispositif du pilote de filtration	32
2.3	Procédure expérimentale mise en place	34
2.4	Méthodes et techniques de caractérisation des matériaux utilisés	37
2.4.1	Analyse des données de base	37
2.4.2	Analyse de la granulométrie	38
2.4.3	Estimation de la porosité : Gammadensimétrie	40
2.4.4	Préparation des échantillons prélevés après les essais de filtration	41
2.4.5	Distribution porale : étude de la porosimétrie par injection de mercure	43
2.4.6	Observations microscopiques	46
2.5	Caractérisation des matériaux utilisés lors des essais	47
2.5.1	Les milieux poreux utilisés : sable	47
2.5.2	Les particules fines injectées : argile	49
2.5.3	Critère de pénétrabilité	57
2.6	Incertitude sur les mesures	59
2.6.1	Gammadensimétrie	59
2.6.2	Estimation des incertitudes de mesure de la densité	60
2.7	Synthèse sur les essais de filtration des particules fines à réaliser .	61
2.8	Conclusion	62

2.1 Position du problème

Le colmatage est un problème majeur lors de l'exploitation et la maintenance associées à de nombreuses applications impliquant l'écoulement souterrain pour le traitement des eaux usées ou polluées et peut finir par limiter la durée de vie du système. Dans le cadre de ce travail, nous allons uniquement nous focaliser sur le colmatage physique d'un filtre. La filtration que nous étudions concerne le problème de colmatage des filtres par matières en suspension. Parmi les matières en suspension que l'on retrouve dans les aquifères, on peut citer les argiles que l'on retrouve aux concentrations allant de 0,2 à 1700mg/l (Kretzschmar et Sticher, 1998). Ces particules argileuses par leurs tailles vont être soumises aux forces hydrodynamiques (*e.g.* d'entraînement, sédimentation) et les forces physico-chimiques (*e.g.* van der Waals, D.L.V.O) présentées dans le chapitre précédent.

Ce chapitre est consacré à la campagne d'essais expérimentaux menés afin de faire le suivi du transport et du dépôt des particules fines argileuses dans différents milieux poreux hétérogènes. Le suivi de la matrice poreuse dans l'espace et dans le temps est réalisé en utilisant le banc gamma-densimétrique. Du fait que la perméabilité est une caractéristique du colmatage du matériau, on étudiera son évolution par l'intermédiaire de la mesure de la chute de pression dans toute la colonne. Ces travaux ont été menés dans des colonnes de laboratoire pour lesquelles les conditions hydrauliques peuvent être contrôlées (*i.e.* débit) et la concentration des fines à l'entrée est imposée. Dans ce qui suit, nous détaillerons le pilote expérimental, le choix des matériaux adoptés pour la filtration de particules fines ainsi que les conditions du déroulement des expériences.

2.2 Dispositif du pilote de filtration

Les essais d'injection de particules fines à travers un milieu poreux sont réalisés à l'aide d'un pilote expérimental de filtration (Figure 2.1). Ce pilote a été réalisé dans le but de reproduire à une échelle réduite une barrière perméable réactive. Il se trouve au laboratoire MSSMAT, dans une pièce isolée à température contrôlée.

Le dispositif expérimental utilisé est schématisé dans la figure 2.2, dans laquelle chaque constituant est énuméré. L'appareillage se compose essentiellement de trois parties :

1. Les colonnes de filtration qui contiennent le matériau, en PVC (Poly Chlorure de Vinyle) cylindriques avec un diamètre de 10cm et une hauteur de 90cm, la section est de 78,54cm². Les colonnes sont reliées par des tuyaux, dont l'écoulement à l'intérieur peut se faire soit en parallèle soit en série. Chaque colonne est reliée à des tubes piézométriques qui permettent



Figure 2.1 – Dispositif expérimental.

de mesurer la différence de charge hydraulique entre plusieurs niveaux de la colonne. Des robinets sont placés le long de la colonne afin d'effectuer des prélèvements à différents niveaux de la colonne si cela s'avérerait nécessaire.

2. Les appareils de mesure : le banc gamma-densimétrique est constitué d'une source radioactive et d'un détecteur. Ils sont placés de part et d'autre de la colonne remplie du matériau granulaire. Le banc gamma-densimétrique est doté d'un moteur de manière à se déplacer solidairement tout en mesurant les profils de la densité durant un essai. Dans chaque colonne sont positionnés plusieurs capteurs :
 - Un capteur de pression différentielle, placé entre l'entrée et la sortie de la colonne ;
 - Un capteur de pH placé à la sortie de la colonne ;
 - Un capteur de conductivité électrique couplé à un thermomètre placé à la sortie de la colonne.

Les mesures des valeurs de pH, température et pression différentielle peuvent être enregistrées d'une manière continue durant un essai grâce à une centrale d'acquisition. Cette station d'enregistrement est raccordée à un ordinateur, le suivi en continu des changements produits dans le milieu poreux lors d'un essai en est facilité.

3. Les appareils de contrôle : une pompe péristaltique qui permet de contrôler le débit injecté. Cette pompe est reliée à un réservoir muni d'un agitateur qui permet de stocker 140 litres d'effluents. Une boîte à effet Venturi placée entre la pompe et la colonne qui a une double fonction, d'une part elle permet de récupérer d'éventuelles bulles d'air introduites dans les tuyaux et d'autre part, l'air comprimé à l'intérieur permet d'amortir les impulsions de la pompe péristaltique. Des essais préliminaires ont montré que ces impulsions dans

le flux, si elles sont fortes, peuvent créer des fluctuations dans la différence de pression enregistrée à travers l'échantillon.

2.3 Procédure expérimentale mise en place

La réalisation d'essais de filtration sur des colonnes de sols nécessite le contrôle de plusieurs étapes : avant chaque essai, nous procédons d'abord à l'étalonnage des différents capteurs (*i.e.* pression différentielle, pH, conductivité électrique) ainsi qu'à l'étalonnage de la pompe péristaltique. Le remplissage de la colonne suit le même protocole pour tous les essais (Figure 2.3). En bas une grille est disposée avec des ouvertures des mailles de 2mm afin d'éviter toute érosion des particules du milieu. Ensuite, on verse une couche de 10cm de gros gravier pour éviter tout dépôt des fines en suspension à l'entrée de la colonne. Les gros graviers permettent de disperser les particules fines dans la solution et ainsi d'avoir une homogénéisation d'effluent à l'entrée du milieu poreux sableux. Puis, le matériau du filtre est mis en place par couches successives de 3cm d'épaisseur de sable sec sur une hauteur totale de 80cm, en vibrant de manière manuelle et en tapotant légèrement la colonne par une barre métallique tous les 3cm versés. Cela permet d'avoir un arrangement régulier des grains et d'éviter une destruction de la structure granulaire en appliquant directement un compactage. Ensuite une grille est mise par dessus le matériau et enfin la colonne est refermée et placée sur le panneau en la raccordant à tous les robinets (voir l'annexe A).

Dans la littérature on trouve différents modes opératoires pour remplir une colonne sans pour autant connaître la meilleure procédure à adopter. Souvent avant de remplir les colonnes par couches successives de matériaux, les praticiens mettent d'abord de l'eau dans la colonne et ensuite ils disposent le matériau. Des couches homogènes et une saturation totale dans le milieu sont obtenues. Cette procédure ne pouvant pas être utilisée dans notre pilote nous prenons d'autres dispositions afin de saturer au mieux le milieu et chasser au maximum les bulles d'airs. Dans tous les cas, quelle que soit la procédure de remplissage utilisée, nous avons la possibilité de connaître la densité dans chaque point de la colonne, en traçant des profils de densité par le banc gamma-densimétrique et alors en extraire les profils de porosité.

Une fois la colonne mise en place, on raccorde tous les robinets et ensuite on met en place les différents capteurs. On mesure les profils de densités sèches du matériau mise en place ($\rho_d = M_s/V_T$, avec M_s la masse des grains de sable et V_T le volume de la colonne). L'étape suivante consiste à saturer le milieu lentement du bas vers le haut, ce qui facilite la sortie de l'air et assure la saturation des colonnes. La durée de saturation peut varier d'un filtre à l'autre selon la taille des grains du filtre qui forment la distribution des pores. Cette étape de saturation se fait en utilisant de l'eau distillée pour éliminer toutes les impuretés qui peuvent se trouver sur

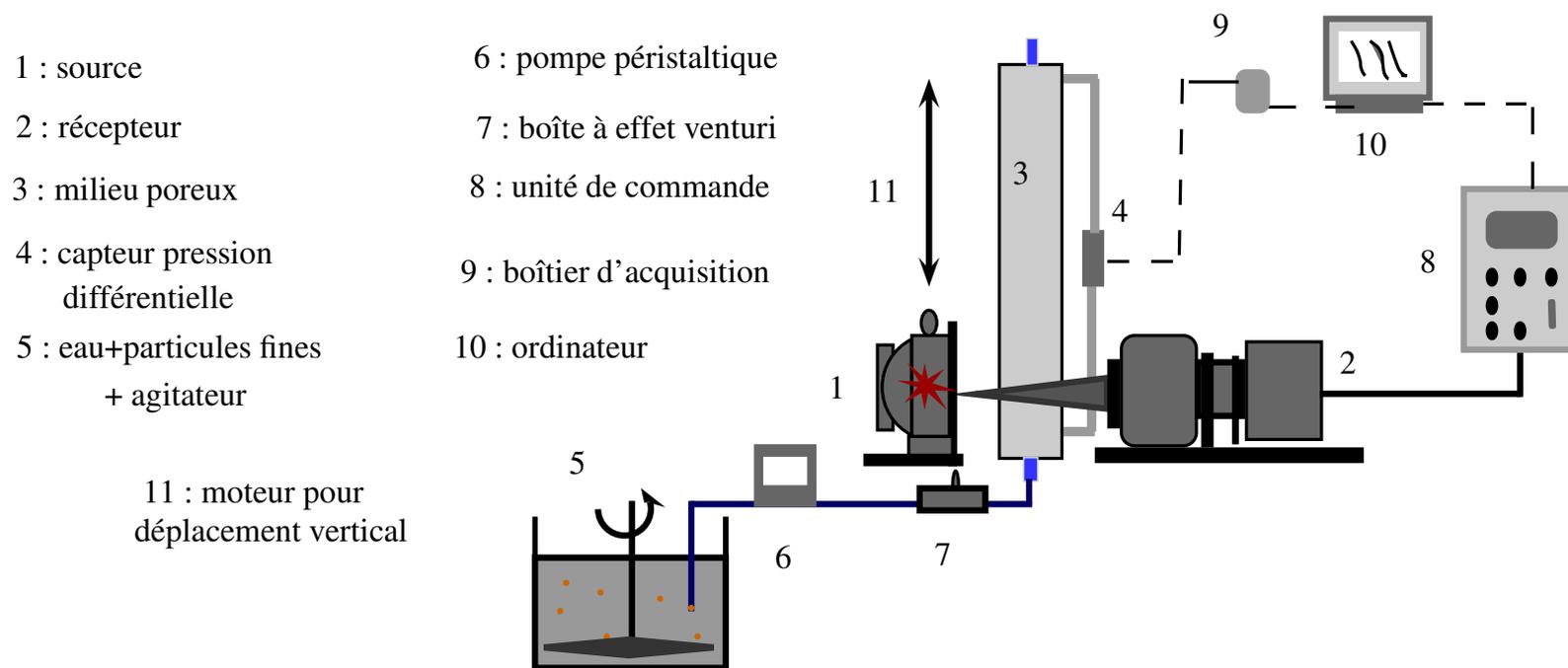


Figure 2.2 – Dispositif colonne-banc gammadensimétrique.

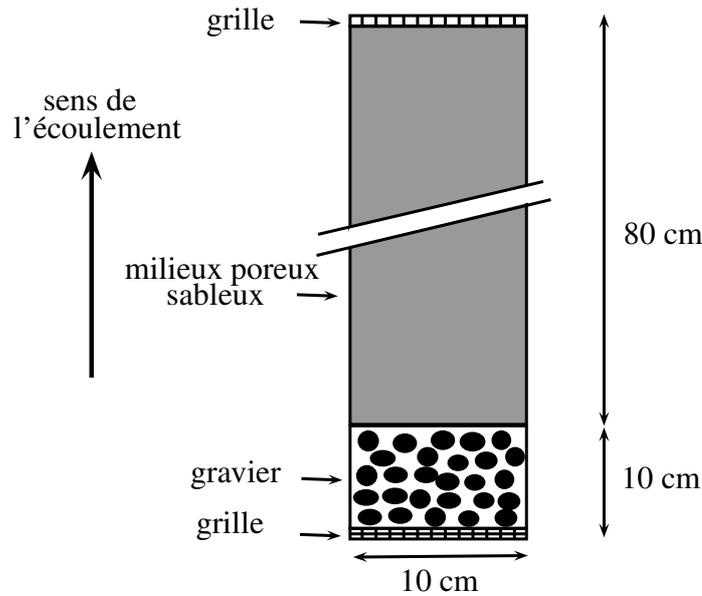


Figure 2.3 – Remplissage de la colonne.

les surfaces du sable, pour cela avant chaque essai de filtration on fait passer de l'eau distillée pendant 48h.

Après la saturation du filtre, la mesure de la perméabilité initiale est réalisée. Pour cela on utilise le capteur de pression différentielle, mais aussi des tubes piézométriques pour une lecture directe de la différence de charge entre le haut et le bas de la colonne. Ceci nous permet d'enregistrer des valeurs de pression tout le long de l'essai. La conductivité hydraulique est déterminée selon la loi de Darcy, présentée dans l'équation 4.2 :

$$\frac{Q}{A} = K \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (2.1)$$

avec :

Q : débit [m^3/s];

A : section de la colonne [m^2], le diamètre de la colonne est de 10cm ;

ΔH : perte de charge dans la colonne [m];

L : longueur de la colonne [m] (à l'emplacement du capteur de pression différentielle entre l'entrée et la sortie de la colonne);

K : conductivité hydraulique [m/s].

En utilisant le gradient hydraulique $i = \frac{\Delta H}{L}$, on obtient

$$\frac{Q}{A} = K \cdot i \quad (2.2)$$

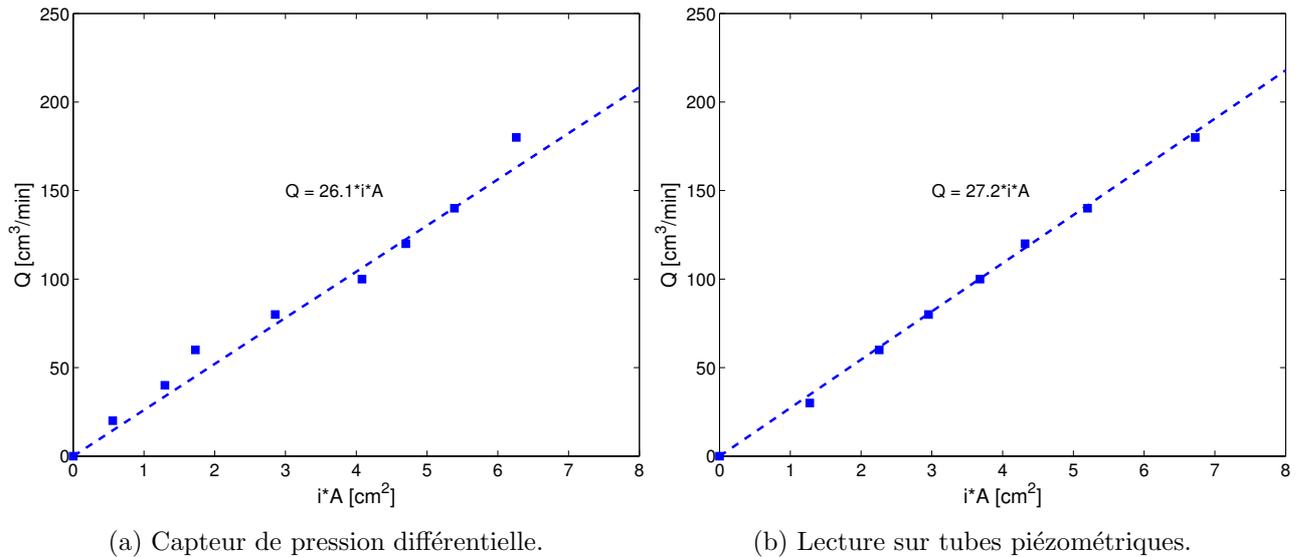


Figure 2.4 – Valeurs de la conductivité hydraulique initiale.

Pour chaque filtre, nous avons varié les débits d'entrées et enregistré à chaque étape la pression différentielle entre le haut et le bas de la colonne. La courbe qui représente le débit en fonction du produit gradient hydraulique i par la section de la colonne A , nous donne une droite, la pente de cette droite représente la conductivité hydraulique initiale. La figure 2.4a donne les résultats de la conductivité hydraulique à l'aide du capteur de pression différentielle. En parallèle, la figure 2.4b donne les résultats de la conductivité hydraulique initiale par des mesures de la différence de charge entre l'entrée et la sortie de la colonne à l'aide de tubes piézométriques et d'un réglét.

2.4 Méthodes et techniques de caractérisation des matériaux utilisés

2.4.1 Analyse des données de base

Le système est bien caractérisé si nous avons une bonne estimation des données d'entrées qui sont :

- La distribution des pores ;
- La distribution de la taille des particules ;
- La charge surfacique du collecteur ;
- La charge surfacique des particules fines.

Le milieu continu est constitué par des volumes occupés par une phase solide (*e.g.* sable, argile, colloïdes, matières organiques) et des volumes vides qui peuvent être remplis par les liquides et les gaz, qui constituent le système poral. L'organisation de la première phase conditionnent le bon fonctionnement de l'autre. De nombreux travaux de recherche ont été consacrés aux relations existantes entre les caractéristiques granulométriques des matériaux (mélanges de plusieurs tailles) et leurs organisations porales par la détermination des spectres de porosité en utilisant des méthodes d'analyse d'image et de porosité à mercure. Fies (1984); Chretien et Pedro (1987) ont utilisé le porosimètre à mercure pour différents mélanges de sables et d'argiles.

Nous présentons dans cette section les appareillages utilisés pour la caractérisation des tailles et formes du sable et de l'argile, par des moyens macroscopiques (granulométrie à sec) et par des moyens microscopiques (Microscope Électronique à Balayage MEB). D'autres techniques d'investigation sont utilisées pour l'analyse de la porosité à différentes échelles. À l'échelle macroscopique, nous avons utilisé la gammadensimétrie pour obtenir des profils de densités et calculer les profils de porosités. Ensuite, à une échelle plus fine, nous avons utilisé deux méthodes : (i) une méthode qualitative en utilisant les observations microscopiques et (ii) une méthode quantitative en s'appuyant sur la porosimétrie au mercure. L'utilisation en parallèle de ces deux méthodes à savoir la microscopie électronique à balayage et la porosimétrie au mercure apparaît comme une approche intéressante et complémentaire pour l'étude de la double porosité structurale des milieux constitués de sable et d'argile. Ceci permet d'en extraire les paramètres de la microstructure telle que la porosité du dépôt et de l'introduire par la suite dans le modèle de filtration phénoménologique.

2.4.2 Analyse de la granulométrie

L'analyse granulométrique est l'une des caractéristiques les plus fréquemment utilisées dans les sols. Elle permet de déterminer la distribution des tailles des particules qui composent le milieu poreux et les tailles des particules en suspension injectées dans ce milieu. Il existe plusieurs méthodes de mesure, dont les champs de mesure dépendent essentiellement de la taille des grains, cela est présenté dans la figure 2.5. Nous utiliserons le tamisage à sec pour les grains du filtre dont la taille est supérieur à $80\mu\text{m}$. En ce qui concerne les particules fines il existe plusieurs méthodes pour en déterminer la taille, la plus conventionnelle est la sédimentation pour les particules de dimension inférieure à $80\mu\text{m}$. Dans la littérature, on retrouve d'autres méthodes indirectes utilisées pour les argiles, comme la microscopie électronique par analyse d'image et la diffraction laser à l'aide des algorithmes améliorés pour l'interaction de la lumière avec de petites particules. Durant nos travaux et afin de caractériser les tailles des particules nous avons utilisé la diffraction laser pour les particules fines en suspension.

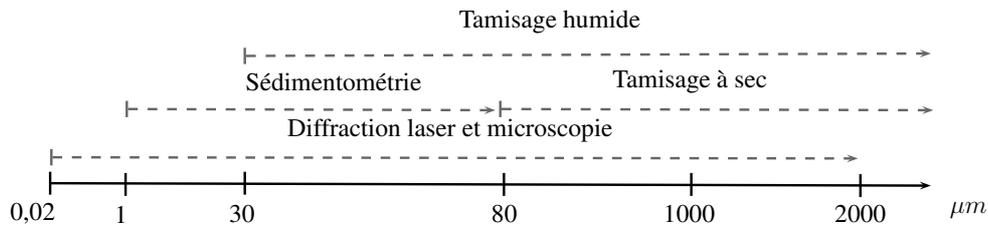


Figure 2.5 – Échelle des principales méthodes de mesure de la granulométrie.

Granulométrie par tamisage à sec

Le tamisage à sec se fait pour des particules supérieures à $80\mu\text{m}$. En deçà, d'autres techniques de caractérisation sont utilisées (Figure 2.5). Dans le but d'avoir la distribution de tailles du milieu poreux étudié, on superpose des tamis de mailles calibrées de façon à avoir une série de tamis de tailles décroissantes et l'on fait passer nos échantillons au travers. Après quelques vibrations, on pèse le refus de matériaux qui ne passe pas au travers des mailles de la série de tamis. On obtient des courbes granulométriques en traçant les tamisats cumulés en fonction des diamètres des tamis. Dans la préparation de nos expériences, nous avons utilisé le tamisage à sec afin de caractériser : (i) la distribution des tailles du matériau, (ii) délimiter les tailles des particules de chaque filtre. Cela afin de classer les particules de sable par leurs tailles et de pouvoir préparer plusieurs filtres de différentes distributions granulométriques.

Granulométrie Laser

La granulométrie laser est une technique indirecte de mesure, elle est basée sur la diffraction de la lumière. Lorsqu'un faisceau monochromatique de la lumière éclaire une particule, on peut observer des franges de diffraction. La distribution granulométrique des particules en suspension est calculée à partir des images enregistrées de diffraction de la lumière. [Mackinnon \(1993\)](#) compare entre l'utilisation de la théorie de Fraunhofer et la théorie de Mie pour les particules de kaolinite, il en déduit la nécessité d'utiliser la théorie de Mie pour le calcul exact de diffusion de la lumière.

L'analyse par granulométrie Laser a été réalisée au Laboratoire LGPM de l'École Centrale Paris, par le granulomètre Laser *QICPIC (N°0144Q)*. La limite de mesure de ce granulomètre laser étant de $2\mu\text{m}$, d'autres tests ont été réalisés par [Hammad \(2010\)](#) sur le même matériau à la faculté de pharmacie de Châtenay Malabry avec une précision de mesure allant jusqu'à $0,01\mu\text{m}$. Au début de chaque mesure, nous devons faire un étalonnage par un essai à blanc, c'est-à-dire juste avec le solvant (dans ce cas, de l'eau distillée). Le choix de la lentille dépend de l'approximation de la taille de nos particules argileuses. Une solution a été préparée avec 5g de kaolinite P300 dans 100ml d'eau distillée. Cette solution a été placée dans une cuve à

ultrasons pendant deux minutes. La technique est rapide (une analyse peut prendre moins de vingt minutes) et ne nécessite que peu de quantités de matériau. La méthode est fiable, en particulier pour les particules de tailles inférieures à quelques micromètres.

Cependant, les distributions de tailles d'argile par rapport aux techniques classiques de sédimentation sont assez éloignées. On retrouve des désaccords entre les deux méthodes laser et sédimentation pour les kaolinites, principalement causés par des écarts de la forme des particules d'isométrie. Pour cela, [Pabst *et al.* \(2000\)](#) avaient proposé d'évaluer les données de sédimentation par la loi de Stokes modifiée qui prend en compte la forme anisotropes des particules.

2.4.3 Estimation de la porosité : Gammadensimétrie

Le gammadensimètre permet de mesurer la densité et d'évaluer la porosité du matériau de manière non destructive (*i.e.* sans effectuer des prélèvements) tout le long de l'injection. La colonne est placée entre une source radioactive césium 137 et un détecteur (Figure 2.6). Cette méthode est basée sur l'atténuation d'un faisceau de rayonnements gamma émis par un radio-élément qui traverse le milieu absorbant (*e.g.* solide, liquide ou gazeux), d'une épaisseur (d) et de masse volumique ρ .

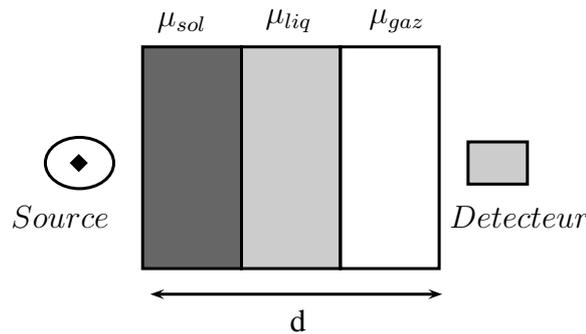


Figure 2.6 – Mesure de la densité d'un milieu multiphasique.

La loi physique d'atténuation appelée loi de Beer-Lambert s'écrit :

$$N = N_0 e^{-\mu_m \cdot d \cdot \rho} \quad (2.3)$$

avec N_0 le nombre de photons incidents dans l'air, N le nombre de photons ayant traversé la colonne d'épaisseur $d = 10\text{cm}$ et $\mu_m [\text{cm}^2/\text{g}]$ le coefficient d'atténuation ou bien d'absorption massique du matériau étudié.

La densité peut aussi être calculée en fonction du taux de comptage $C_t = N/t$. Sachant que les comptages dans l'air et dans le matériau se font pendant la même durée t , l'expression de la

densité peut s'écrire tel que :

$$C_t = C_{t0} e^{-\mu_m \cdot d \cdot \rho} \implies \rho = \frac{-1}{\mu_m \cdot d} \cdot \ln \frac{C_t}{C_{t0}} \quad (2.4)$$

La gammadensimétrie nous permet d'avoir l'évolution de la matrice poreuse et ainsi de suivre l'évolution et le transfert des fines particules dans le milieu poreux durant l'essai.

2.4.4 Préparation des échantillons prélevés après les essais de filtration

La connaissance de la microstructure du milieu poreux composé de sable et d'argile est fondamentale et nécessaire pour la compréhension du phénomène de filtration. En outre, il nous faut les informations sur la distribution des pores, la formation et les orientations des particules fines, la tortuosité du milieu et la porosité du dépôt ainsi que la porosité du squelette sableux. Afin d'y accéder nous avons besoin d'une bonne préparation des agglomérats prélevés à différents niveaux de la colonne après chaque essai de filtration. Les méthodes d'études de la microstructure imposent une élimination de l'eau interstitielle, ces prélèvements d'échantillons doivent être séchés avant de les passer au MEB et au porosimètre à mercure. Dans la littérature, il existe différentes techniques de séchage des échantillons ([Delage et Pellerin, 1984](#); [Vennat, 2009](#)) :

- Le séchage à l'air ou au séchoir, cette technique n'est pas très adaptée dans le cas des argiles et principalement des argiles gonflantes qui restent hydratées ;
- Le séchage à l'étuve à 105°C, par ce procédé on peut avoir un retrait et donc une modification de la microstructure ;
- Le séchage à l'hexaméthylsilazane (HMDS) (utilisé en biologie) ;
- Le point critique, où on remplace l'eau par du CO₂ et on augmente la température et la pression de l'échantillon (374°C et 22,4MPa) ;
- Le séchage à froid ([Figure 2.7](#)), par lyophilisation qui est la technique la plus utilisée dans différents domaines (*e.g.* la bio-mécanique, l'étude des argiles consolidées).

La lyophilisation va nous permettre de passer de l'état liquide à l'état gazeux en évitant le point triple, afin de conserver la microstructure initiale des échantillons lors de la déshydratation ([Delage et Pellerin, 1984](#)). Pour nos échantillons, nous utiliserons ce mode de séchage. Il consiste à évacuer l'eau qui est déjà solide dans les pores du matériau par sublimation. Le principe de base est que lorsque l'on réchauffe l'eau solide à très basse pression, l'eau se sublime. Donc on passe directement de l'état solide à l'état gazeux en évitant la formation de ménisques liquides (à l'origine de forces capillaires qui entraîneraient un retrait du matériau). La Lyophilisation est réalisée en trois étapes :

- On plonge les échantillons dans de l’azote liquide, qui les congèle à -196°C , l’eau dans les pores se transforme alors en glace.
- On effectue ensuite une dessiccation primaire sous vide. Elle consiste à sublimer la glace libre (interstitielle), donc sans effet d’ébullition (pas d’eau en phase liquide).
- Ensuite nous procédons à la dessiccation secondaire. On réchauffe le plateau sur lequel sont placés les échantillons. Ceci permet d’extraire par désorption les molécules d’eau piégées à la surface des échantillons séchés.

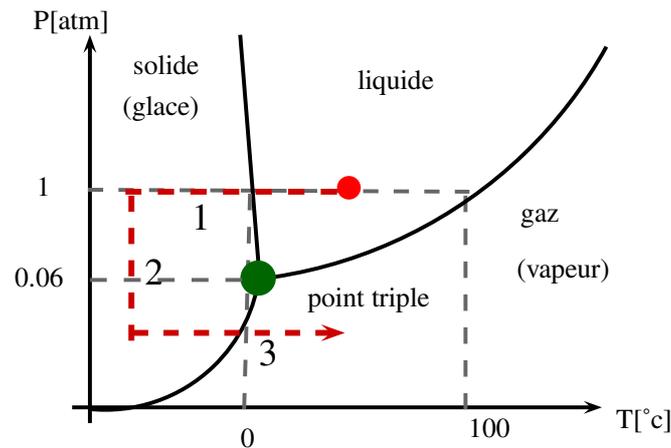


Figure 2.7 – Technique de séchage par lyophilisation : le chemin de l’eau par sublimation.

La durée de la lyophilisation dépend de la taille de l’échantillon et de sa teneur en eau. Dans le cadre de notre travail, la durée de lyophilisation était de 24 heures.

Bien que la lyophilisation soit une technique très utilisée principalement pour l’étude microscopique des argiles lui permettant de conserver une microstructure intacte (Delage et Pellerin, 1984; Guillot *et al.*, 2002; Souli, 2006; Hammad, 2010), les résultats obtenus par Guillot *et al.* (2002) montrent qu’il y a des porosités occluses qui ne sont pas prises en compte dans ce mode de séchage. Pour cela, ils ont fait chauffer des échantillons préalablement lyophilisés à 450°C , faisant apparaître une eau résiduelle comprise entre 4,9 et 7,1 % de la porosité totale de l’échantillon. En outre, les méthodes de séchage à 105°C ou bien la lyophilisation ne permettent pas d’extraire l’eau interfoliaire sans en modifier la texture.

Une fois les échantillons lyophilisés, nous pouvons procéder à la détermination de la porosité globale, la porosité microstructurale, la distribution des pores d’accès ainsi que la tortuosité de l’échantillon.

2.4.5 Distribution porale : étude de la porosimétrie par injection de mercure

Les essais de porosimétrie que nous effectuons sur des prélèvements colmatés après les essais de filtration vont nous permettre d'étayer notre connaissance sur une éventuelle double-porosité (sable/argile) présente dans le milieu. L'essai nous fournit plusieurs informations sur des paramètres géométriques, telles que la taille des rayons d'accès de pores et la tortuosité dans le milieu. Notre principal intérêt est l'obtention de la distribution des pores en suivant le volume poreux accessible au mercure.

Des travaux antérieurs sur la porosité d'assemblage de particules dans les sols en utilisant la porosimétrie au mercure ont été nécessaires. Particulièrement, les études de Fies (1984) sur la porosité des mélanges de squelette constitués de sable (Fontainebleau 100 – 200 μm) ou bien de limon (2 – 20 μm) avec une argile gonflante. Ces travaux montrent que l'espace poral textural peut être divisé en deux : (i) les pores lacunaires résultant de l'arrangement des grains qui constituent le squelette (sable ou limon), et (ii) les pores propres à la phase argileuse. Les résultats montrent que les diamètres des pores d'accès du compartiment lacunaire décroissent quand le pourcentage d'argile augmente. Parallèlement, le volume de mercure accessible dans le compartiment des pores argileux augmente. Cette double porosité du mélange est distincte pour des pourcentages d'argile entre 15 et 80 %, au delà de 80 %, seuls les pores propres des argiles sont présents.

En se basant sur les travaux de Fies (1984) pour nos essais au porosimètre à mercure, on doit s'attendre à avoir une première intrusion de mercure qui correspondrait aux pores lacunaires formés par le squelette sableux, suivie d'une seconde intrusion du mercure correspondant aux pores propres à la phase argileuse (le dépôt).

Principe de la porosimétrie au mercure

La méthode consiste à appliquer des paliers de pression au mercure afin de mesurer le volume de mercure qui a pu pénétrer dans les pores de l'échantillon. Le mercure contrairement à l'eau est un fluide non mouillant, il ne pénètre pas spontanément dans les pores, cela procure la possibilité de contrôler l'injection au moyen de la pression. L'application graduelle de ces pressions permet d'infiltrer des régions de plus en plus confinées de la porosité, remplissant ainsi des pores de plus en plus petits.

La loi de Jurin-Laplace relie les pressions appliquées d'un fluide non mouillant dans des échantillons, au diamètre équivalent des pores d'entrée (assimilés à des cylindres), en appliquant la relation suivante :

$$D_a = -\frac{4 \cdot \sigma_{Hg} \cdot \cos\theta_{Hg}}{P_{Hg}} \quad (2.5)$$

avec :

σ_{Hg} : la tension superficielle du mercure prise égale à 0,485 N/m ;

θ_{Hg} : l'angle de raccordement du ménisque à la paroi, il est généralement pris égal à 130° dans le cas de mélange kaolinite-sable (Fies, 1984) ;

P_{Hg} : la différence de pression de part et d'autre du ménisque ;

D_a : le diamètre du capillaire au pore au niveau du ménisque, diamètre d'accès.

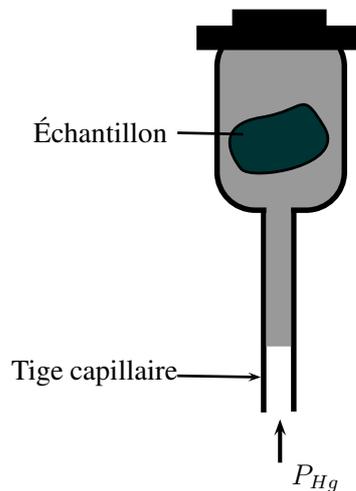


Figure 2.8 – Pénétromètre.

L'échantillon préalablement lyophilisé est placé à l'intérieur du pénétromètre en verre comportant un capillaire calibré (Figure 2.8). Le pénétromètre est ensuite placé dans la cellule basse pression de l'appareil (porosimètre *Micromeritics Auto Pore IV*, Figure 2.9). L'essai peut alors commencer et il se déroule en 3 étapes : la première phase consiste à mettre l'échantillon sous vide initial correspondant à une pression inférieure à $7, 10^{-6}$ MPa, pour que l'ensemble du milieu soit disponible à l'injection du mercure. Lors de la deuxième phase, le mercure est introduit dans le pénétromètre à basse pression, puis la pression est augmentée progressivement pas à pas jusqu'à atteindre la pression atmosphérique, cela permet de mesurer les pores lacunaires. La troisième phase, dite haute pression, nécessite le déplacement du pénétromètre vers la cellule haute pression immergée d'huile. Le pénétromètre est placé verticalement et des pressions sont appliquées jusqu'à la pression maximale de l'appareil 209MPa. Le volume de mercure pénétré est mesuré à chaque pas de pression au moyen de la position du ménisque dans la tige capillaire du pénétromètre.

L'équation 2.5 relie la pression d'injection à la taille des pores pénétrés par le mercure, elle ne peut pas être appliquée sans adopter une hypothèse sur la forme des pores en troncs cylindriques de section circulaire et de diamètre D_a .

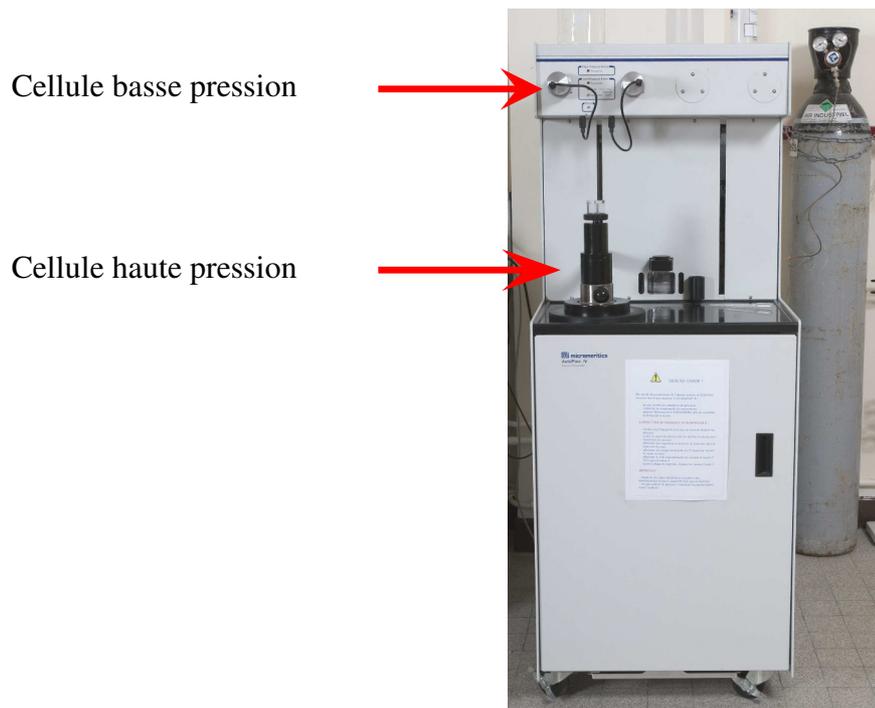


Figure 2.9 – Porosimètre par injection de mercure-ECP.

Les difficultés rencontrées

Les essais sont réalisés sur des échantillons de petites tailles (*i.e.* centimétrique), préalablement séchés. Pendant la préparation, il faudrait que le sol conserve un minimum de cohésion après le séchage afin que l'on puisse dégager des fragments et les introduire dans le pénétromètre. Cependant, les mesures s'effectuent pour des échantillons où souvent il n'y a que peu de dépôt d'argile, donc pratiquement pas de cohésion. Souvent, un écoulement de l'échantillon est constaté lors de l'injection du mercure. Ce phénomène est observé dans le cas des sables assez fins. Nous tenons à signaler que d'après [Delage et Pellerin \(1984\)](#), la méthode de séchage choisie par lyophilisation tend à rendre l'échantillon moins friables que les autres modes de séchage utilisés (*e.g.* point critique, séchage au four).

Un autre point important concerne une limitation de la méthode due au fait que la porosimétrie au mercure ne mesure que le rayon d'accès et non pas les dimensions des pores. Afin de faire la différence entre la porosité libre et la porosité piégée (cas de pores en bouteille d'encre), [Pellerin \(1979\)](#) (cité dans [Delage et Pellerin, 1984](#)) propose de pratiquer une double injection, où la première injection mesure la porosité totale et la seconde injection mesure uniquement la porosité libre pour laquelle le rayon d'accès correspond au rayon du pore. En faisant la différence

entre les deux courbes, les seuils d'accès à la porosité constrictive (piégée) sont obtenus.

2.4.6 Observations microscopiques

L'utilisation du microscope électronique à balayage (MEB) est assez courante en biologie, chimie, métallurgie, médecine et en géologie. Les observations au microscope permettent de fournir des informations sur la morphologie (*e.g.* forme, taille, arrangement) et la composition chimique des échantillons (*e.g.* sable, argile, métaux). Nous utilisons cette technique afin d'étayer les résultats trouvés par la méthode de porosimétrie sur la double porosité, mais aussi pour nous renseigner sur la topographie, les orientations du dépôt et la formation des ponts entre les grains de sables. Ceci enrichit davantage nos connaissances sur les sites de rétention formés dans le milieu poreux.

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) qu'elle soit environnementale ou classique, est basée sur l'interaction possible entre un faisceau d'électrons et une matrice cristalline afin d'obtenir des informations sur : (i) le relief (topographie) de l'échantillon, (ii) la morphologie des grains et leur agencement. Le canon produit un faisceau d'électrons grâce à un filament (du tungstène dans le cas du microscope au LCPC) chauffé par un courant de thermo-ionisation. Ce faisceau est accéléré par la haute tension (de 500V à 30kV) créée entre le filament et l'anode. Il est ensuite focalisé sur l'échantillon par une série de trois lentilles électromagnétiques.

L'étude de la microstructure des sols grâce aux images réalisées par le MEB n'est pas aisée. Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à des méthodes de traitements pour le calcul de l'orientation des particules lors de différents chargements. [Hicher *et al.* \(2000\)](#); [Bouziri-Adrouche \(2007\)](#) ont choisi de quantifier ces orientations suivant des axes par un travail manuel, directement sur les images MEB. Des logiciels basés sur des algorithmes de traitements d'images existent pour faciliter la quantification des orientations des particules. [Hernandez *et al.* \(1997\)](#); [Wantanaphong *et al.* \(2006\)](#) se sont intéressés à la quantification des espaces porales, la distribution des pores par l'utilisation des images MEB binarisées. [Hammad \(2010\)](#) quand à lui a automatisé le processus de quantification manuelle pour avoir les contours des particules et l'orientation suivant les différents chargements.

Dans le cadre de nos recherches, nous avons utilisé deux types de microscopes : (i) à l'ECP, le microscope électronique à balayage à effet de champ FEG LEO 1530 (LEO Elektronenmikroskopie GmbH, Oberkochen, Allemagne). Ce microscope est utilisé dans le cas des échantillons préparés et lyophilisés. (ii) au LCPC, le microscope électronique à balayage utilisé est FEI Company (Philips) Quanta 400, capable de travailler en mode environnemental. Les MEBs dotés de chambre environnementale sont capables de réaliser des observations en présence de vapeur d'eau dans la chambre. Les observations des échantillons prélevés d'un essai de filtration sont réalisées sans passer par la méthode de séchage. Dans ce cas, l'échantillon garde une bonne co-

hésion grâce aux ménisques d'eau encore présents entre les grains, permettant ainsi de quantifier la porosité lacunaire.

Les sables et les argiles sont des matériaux non conducteurs. Avant d'observer les échantillons préalablement lyophilisés au MEB, il est préférable de les métalliser. Le métal utilisé est l'or pour sa facilité à émettre des électrons secondaires, il faut recouvrir les échantillons d'une couche fine de ce métal.

2.5 Caractérisation des matériaux utilisés lors des essais

La taille des particules, leurs formes, leurs rugosités sont autant d'éléments qui forment les pores et qui sont à prendre en compte pour le colmatage physique.

2.5.1 Les milieux poreux utilisés : sable

Durant nos expérimentations, le sable a été retenu comme modèle pour constituer notre milieu poreux. La répartition des tailles de particules qui constitue le milieu poreux influence les essais de filtration. Le choix de la taille des grains joue un rôle très important étant donné qu'ils conditionnent la perméabilité et par conséquent le bon fonctionnement d'un filtre. Dans la littérature, beaucoup de groupes de recherche ont travaillé sur les problèmes liés au transport et au dépôt des particules fines. Cependant, le milieu poreux utilisé était toujours simplifié en utilisant des billes de verres.

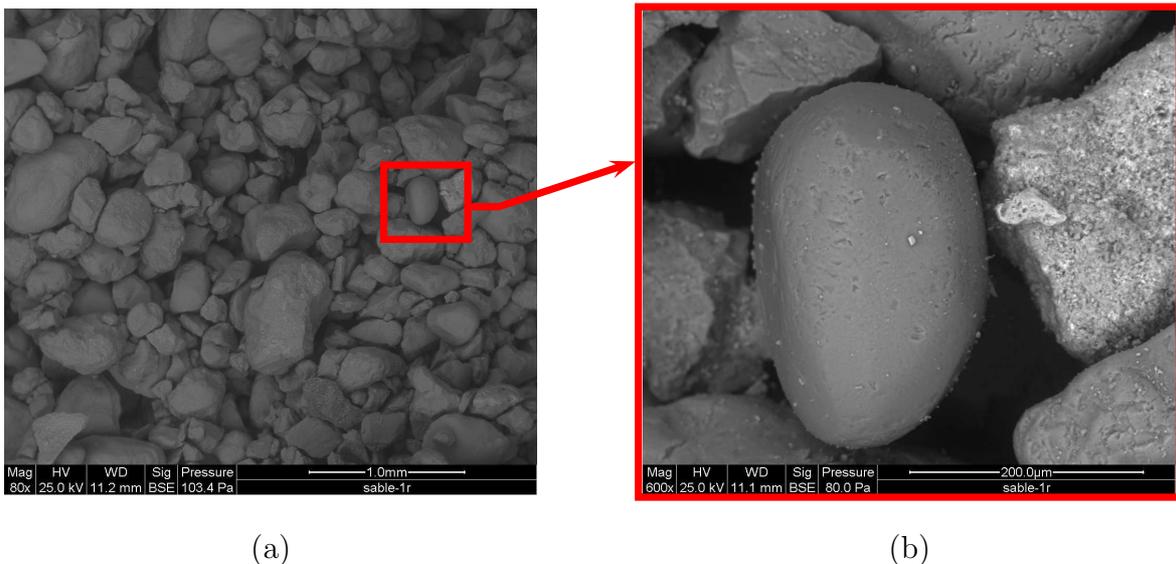


Figure 2.10 – Sable : photos MEB prises au LCPC.

Afin d'étudier la complexité du choix du filtre et son impact sur le comportement hydraulique, différentes granulométries ont été testées. Pour un sable d'une granulométrie étalée (0,08-6mm), nous avons délimité des intervalles de taille de particules afin d'avoir différentes classes de particules : un filtre d'une granulométrie fine (Gf) pour les petites particules, un filtre d'une granulométrie grossière (Gg) qui représente les grosses particules et un dernier avec une granulométrie moyenne (Gm). Les observations microscopiques (Figure 2.10a) montrent que les particules de sable ont des formes assez variables. Le sable présente des formes angulaires et parfois arrondies (Figure 2.10b) avec une surface assez rugueuse. Donc, le milieu choisi est hétérogène dans la forme mais aussi dans la taille des particules.

Granulométrie du sable

Les courbes granulométriques du sable réalisées par tamisage à sec sont données dans la figure 2.11. Les diamètres représentatifs sont donnés dans le tableau 2.1, où D_n représente le diamètre du tamis dont n% du matériau passe à travers le tamis. Chaque filtre a un diamètre maximum et un diamètre minimum ainsi qu'un coefficient de forme Cu , dont le maximum est égale à 1,9.

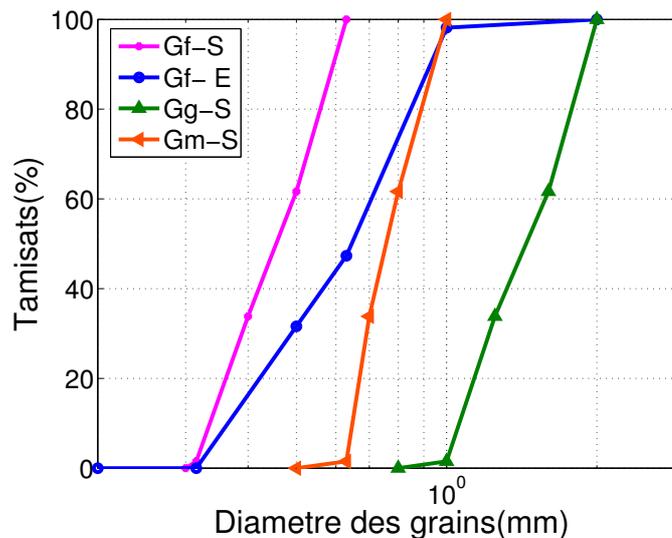


Figure 2.11 – Courbes granulométriques des sables utilisés.

Diamètre représentatif des grains

Dans la littérature, il existe de nombreuses manières pour définir un diamètre représentatif des grains utilisés pour des assemblages. Le choix de ce diamètre représentatif des grains diffère selon le phénomène de filtration recherché et le besoin de l'application. Par exemple, le diamètre

Table 2.1 – Les diamètres nécessaires de chaque milieu poreux utilisé.

Paramètres [mm]	S1/ Gf-S	S2/ Gf- E	S3/ Gf- E	S4/ Gf- E	S5/ Gg-S	S6/ Gm-S	S7/ Gf-S	S8/ Gf-S
$D_{min} - D_{max}$	0,3-0,63	0,315-1	0,315-1	0,315-1	1-2	0,63-1	0,3-0,63	0,3-0,63
D_5	0,32	0,34	0,34	0,34	1,05	0,65	0,32	0,32
D_{10}	0,33	0,36	0,36	0,36	1,12	0,66	0,33	0,33
D_{15}	0,34	0,4	0,4	0,4	1,17	0,67	0,34	0,34
D_{50}	0,45	0,65	0,65	0,65	1,5	0,75	0,45	0,45
D_{60}	0,5	0,7	0,7	0,7	1,62	0,8	0,5	0,5
$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} [-]$	1,5	1,9	1,9	1,9	1,45	1,2	1,5	1,5
* <i>S</i> : sable, <i>G</i> : granulometrie, <i>f</i> : fine ; <i>g</i> : grossiere, <i>m</i> : moyenne, <i>E</i> : étalée, <i>S</i> : serrée								

équivalent qui correspond à la moyenne des particules est déterminé par la courbe granulométrique, le D_{50} . Durant la filtration de particules fines, le diamètre représentatif d'un filtre doit permettre aux plus grosses particules en suspension de passer. Ce diamètre devra représenter le cas le plus préjudiciable pour le milieu. [Honjo et Veneziano \(1989\)](#) donnent un critère empirique à partir des essais au laboratoire et déterminent le D_{15} comme le diamètre représentatif pour le modèle de rétention des particules dans les sols. Ce diamètre correspondrait au diamètre des pores dans des modèles de pénétrabilité. Le D_{15} est tiré de la courbe granulométrique (Tableau 2.1).

Minéralogie et composition chimique

L'analyse par diffraction des rayons X et par analyse chimique au microscope électronique à balayage montrent que le sable utilisé est un sable siliceux SiO_2 , formé essentiellement de grains de quartz qui est un minéral constitué de silice (Figure 2.12).

2.5.2 Les particules fines injectées : argile

Bien qu'il existe plusieurs types de particules fines (organique, non organique) et des particules artificielles en latex, on s'intéresse aux particules fines argileuses qui véhiculent la pollution. Il faut aussi choisir un type d'argile parmi les trois familles principales : (i) la kaolinite, (ii) l'illite et (iii) la smectite. Notre choix s'est dirigé vers la première famille d'argile qui est la moins gonflante. La kaolinite choisie est la P300, précédemment utilisée au sein du laboratoire Mécanique des sols structures et matériaux (MSSMat) pour des essais mécaniques. La P300 se présente sous la forme de plaquettes rigides stables en présence d'eau ([Bouziri-Adrouche, 2007](#)).

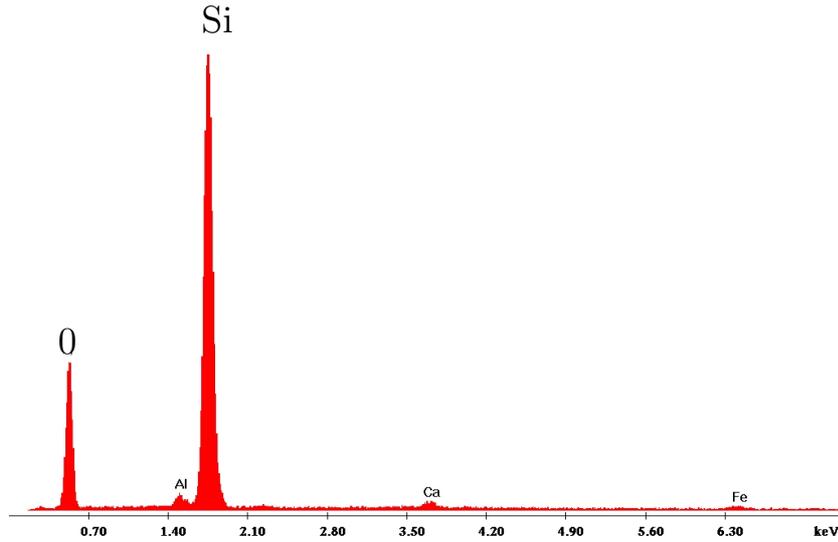


Figure 2.12 – L’analyse chimique du sable propre.

Les propriétés physico-chimiques ont déjà été identifiées, cela nous affranchit d’une minéralogie trop complexe pour les essais de filtration. Par ailleurs, une brève synthèse sera établie dans les paragraphes suivants sur les différentes propriétés minéralogiques et texturales des argiles ainsi que l’organisation microscopique des particules de la kaolinite.

Minéralogie

Les minéraux argileux font partie de la famille des phyllosilicates dont l’unité de base est le feuillet (Hassan, 2005). Ils se présentent généralement sous forme d’un empilement de feuillets ou de plaquettes. Ces feuillets sont constitués de l’association de deux ou plusieurs unités structurales de base : couches tétraédriques de silice (T) associées aux couches octaédriques d’hydroxyde d’aluminium (O).

Il existe différentes classifications des argiles. La plus classique s’est établie suivant l’assemblage de ces deux couches (l’épaisseur et la structure du feuillet) et des types de substitutions isomorphiques contenues dans les couches. On distingue ainsi trois familles (Figure 2.13) :

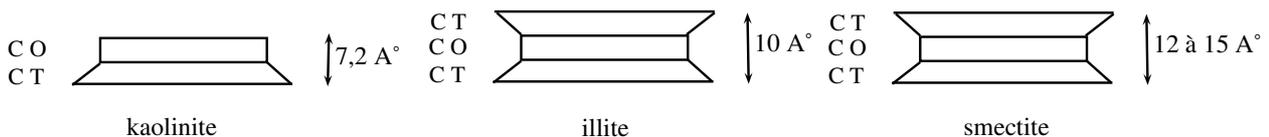


Figure 2.13 – Structure des principales familles d’argiles.

- **Les kaolinites** où le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T : O ou de type 1 : 1 ; son épaisseur est d'environ 7\AA . La formule générale est $Si_2Al_2O_5(OH)_4$ et le feuillet est neutre. Les feuillets sont liés par des liaisons d'hydrogènes et des forces de type van der Waals. Les feuillets n'étant pas identiques, les liaisons sont faibles aux extrémités et la particule est chargée électriquement (Hammad, 2010).
- **Les illites** où le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T : O : T ou de type 2 : 1 ; son épaisseur est d'environ 10\AA . L'espace interfoliaire est complètement occupé par l'ion potassium K^+ qui en perdant son eau d'hydratation entraîne une fermeture des feuillets fortement chargés. Par conséquent, les molécules d'eau ne parviennent pas à s'engager entre les feuillets.
- **Les smectites** où le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T : O : T et de couches octaédriques interfoliaires hydratées. Son épaisseur est d'environ 15\AA . La charge du feuillet est négative, elle est compensée par des cations interfoliaires hydratés qui sont le plus souvent le calcium ou le magnésium. Les smectites ont une haute capacité d'échange cationique et une grande absorption des molécules d'eau entre les feuillets (jusqu'à cinq à six couches de molécules d'eau), d'où leur propriété de gonflement et leur faible conductivité hydraulique. Grâce à ces propriétés, la smectite est utilisée comme isolant pour les fonds de décharge (barrières ouvragées) ou dans les boues de forage pétroliers.

La composition minéralogique de la P300 est déterminée par le spectre caractéristique de diffraction des rayons X. L'analyse par la diffraction des rayons X (DRX), montre que les échantillons testés sont constitués principalement de la kaolinite avec une faible présence d'illite et de quartz (Bouziri-Adrouche, 2007). La figure 2.14 présente l'analyse chimique en utilisant le microscope électronique à balayage.

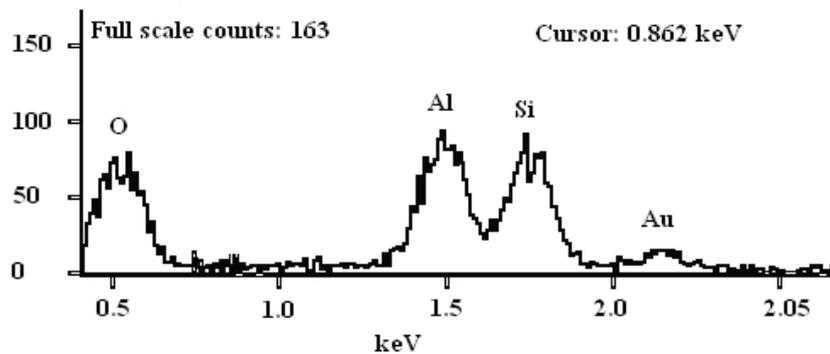


Figure 2.14 – Analyse DRX de la kaolinite P300

$Si/Al \approx 1$ (Hammad, 2010).

Morphologie de la kaolinite et le facteur de forme

La particule élémentaire de la kaolinite est formée par un empilement de feuillets dont la forme est hexagonale. Elle est déterminée par sa surface basale et sa surface latérale (Figure 2.15). Le facteur de forme d'une kaolinite peut être déterminé soit d'une manière unidimensionnelle, en extrayant la taille des particules de la distribution granulométrique (sédimentométrie ou granulomètre laser) ou bien en bidimensionnel (fonction des surfaces basales et latérales).

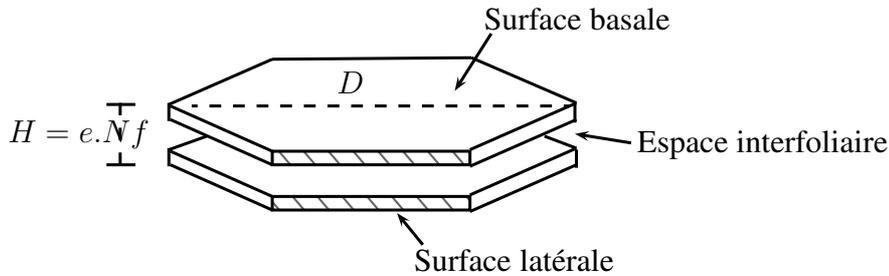


Figure 2.15 – Morphologie de la kaolinite.

Pour une particule, ces relations peuvent être exprimées par : $R_1 = D/H$ et $R_2 = S_{bas}/S_{lat}$, où D est le diamètre défini par la distribution granulométrique, en utilisant la diffraction laser ou la sédimentométrie et cela peut être appuyé par des analyses d'images microscopiques. La hauteur des feuillets superposés H dépend de l'épaisseur d'un feuillet e et du nombre de feuillets superposés Nf . Ce dernier varie suivant les conditions qui existent entre les feuillets, cet espace est appelé espace interfoliaire. Pour la kaolinite, l'interfeuillet ou l'espace interfoliaire est vide et les feuillets sont neutres et liés entre eux par des liaisons d'hydrogènes. L'utilisation de la diffraction des rayons X fournit des informations assez aisément pour les variations de hauteur H de la particule d'argile. À partir du diamètre représentatif D et la hauteur H , il est possible d'obtenir le facteur de forme et la surface spécifique de la particule de kaolinite formée par un certain nombre de feuillets Nf .

Organisation texturale de la kaolinite

L'organisation de la structure des argiles a été étudiée en utilisant des techniques diverses pour caractériser l'évolution de l'organisation des pores en fonction de la minéralogie des argiles, de l'activité de l'eau, des cations échangeables et de l'histoire des contraintes, d'après Mitchell (1993) (cité dans Vasseur *et al.*, 1995). Des observations MEB (microscope électronique à balayage) et MET (microscope électronique à transmission) permettent de tirer les différents niveaux d'organisation dans le système argileux. Différents groupes de recherches ont mis en évidence trois niveaux d'organisation dans les systèmes argileux. Bouziri-Adrouche (2007) et Hammad (2010) citent Tessier (1984), pour le système d'assemblage multi-échelles

de la kaolinite et par ailleurs, ils citent [Pluart *et al.* \(2004\)](#) dans le cas de la montmorillonite. Dans la figure 2.16 nous présentons les différents niveaux d'organisation de l'argile selon différentes échelles d'observation du microscopique jusqu'au macroscopique (feuillelet \rightarrow particule \rightarrow agrégat \rightarrow assemblage d'agrégats).

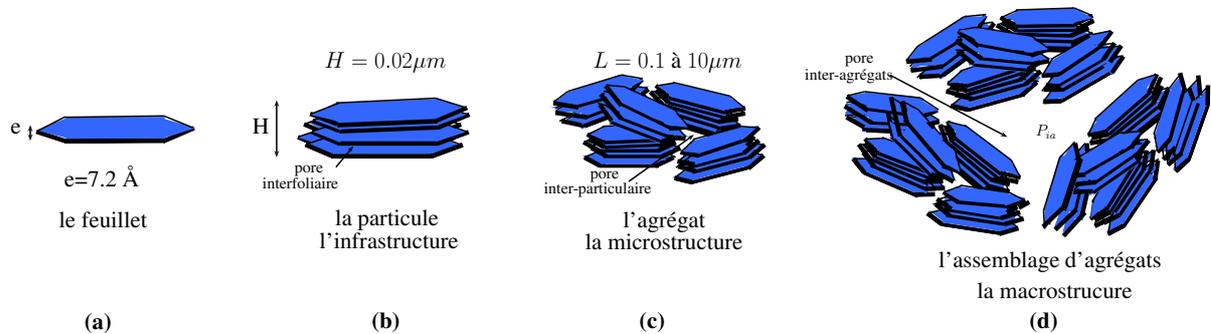


Figure 2.16 – Représentation schématique de l'assemblage structurelle de la kaolinite à différents niveaux.

- **Le feuillelet** (Figure 2.16a) constitue l'unité structurelle de base qui définit le type d'argile. C'est suivant l'occupation du cation compensateur et la morphologie du feuillelet que les argiles se distinguent. Pour la kaolinite le feuillelet est assimilable à une plaquette rigide de forme hexagonale (Figure 2.17a), d'un diamètre avoisinant les $1\mu\text{m}$ et d'une épaisseur de 7\AA . La charge du feuillelet est nulle et la superposition de plusieurs feuillets constitue une particule.
- **La particule primaire** (Figure 2.16b) est l'association de plusieurs feuillets (Nf) de la kaolinite. La structure de la particule observée dans un plan perpendiculaire au plan des feuillets suit un empilement ordonné pour la kaolinite ([Benchabane, 2006](#)), de telle sorte que les feuillets sont empilés les uns sur les autres dans un ordre parfait. Afin de définir cette épaisseur d'empilement d'une particule primaire ordonnée, des observations microscopiques sont indispensables. L'épaisseur et la densité sont données par la structure théorique de la kaolinite ($e = 7,2\text{\AA}$ et $\rho_s = 2,65\text{ g/cm}^3$), la surface spécifique de la kaolinite P300 serait $S_s = \frac{2}{\rho_s \cdot d} = 1078\text{m}^2/\text{g}$. La surface spécifique de la kaolinite P300 mesurée par l'éthylène Glycol est d'environ $40\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, cela nous donne environ 26 couches élémentaires empilées pour former la particule primaire et une hauteur de la particule primaire d'environ $H = 0,02\mu\text{m}$ (pour un diamètre d'environ $1\mu\text{m}$). Les observations MEB permettent de comprendre l'arrangement des particules. La figure 2.17b sur des observations au MEB des arrangements des particules de kaolinite, elle indique des épaisseurs plus importantes de la particule allant jusqu'à $1\mu\text{m}$ et nous pouvons aussi voir des arrangements assez complexes entre les particules. Par un autre moyen, [Vasseur *et al.* \(1995\)](#) ont effectué des

observations au MET sur des kaolinites, ils indiquent que les particules sont plus épaisses que $0,02\mu\text{m}$, on retrouve également l'agencement des particules qui forment des agrégats complexes (Figure 2.18).

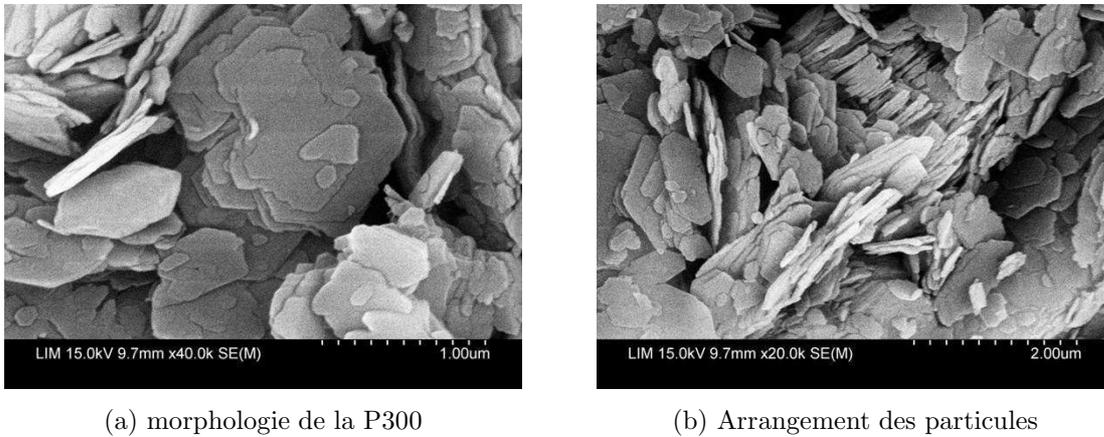


Figure 2.17 – Observation microscopique de la forme et arrangement des particules de kaolinite P300.

- **L'agrégat** (Figure 2.16c) est l'assemblage de plusieurs particules (appelé aussi agglomérat). Les dimensions de l'ensemble varient entre $0,1$ et $10\ \mu\text{m}$ (Pluart *et al.*, 2004). Les particules de kaolinite qui forment l'agrégat sont arrangées d'une manière face à face et ordonnée.
- **Assemblage d'agrégats** à une échelle macroscopique (Figure 2.16d), elle représente la dernière échelle de la structure argileuse. C'est un ensemble d'agrégats et des liens inter-agrégats (ponts d'argile). On trouve parfois des particules non argileuses à l'intérieur, formant ainsi des géométries assez complexes et un milieu poreux très hétérogène (Bouziri-Adrouche, 2007).

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons à l'organisation des particules en suspension dans l'eau soumises à des vitesses de fluide variables dans les pores. Cependant, il serait intéressant de voir l'orientation des particules qui sont soumises aux conditions hydriques. L'orientation des particules ou plutôt la réorientation des particules suivant le chemin de contrainte appliqué a été étudié auparavant pour la kaolinite P300 (Bouziri-Adrouche, 2007; Hammad, 2010), cela en utilisant la microscopie électronique et la porosimétrie au mercure. Il a été observé une réorientation systématique de particules d'argile en fonction de la charge de consolidation. D'autres techniques utilisées en sciences du sol, telles que la polarisation microphotométrique analyse (Vasseur *et al.*, 1995) ou bien la microscopie à transmission électronique (Tessier, 1984) peuvent également être utilisées. Vasseur *et al.* (1995) se basent sur une association des résultats obtenus sur des échantillons de kaolinite, en utilisant l'analyse

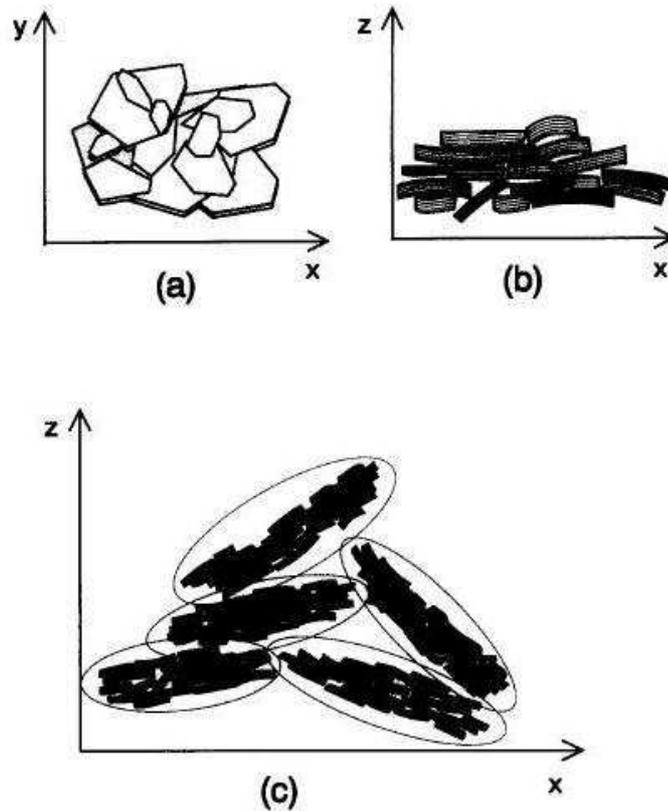


Figure 2.18 – Structure des particules de la kaolinite avec : (a) une particule vu de son côté plat, constituée de plusieurs feuillets de base ; (b) section d’une particule ; (c) assemblage de quelques-unes des particules avec la présence de pores interparticulaires (Vasseur *et al.*, 1995).

granulométrique, la microscopie électronique et les mesures de surface spécifique. Ils expliquent le fait qu’une diminution de la porosité sous forte contrainte est due à la réorientation des particules et non à la variation de la taille des particules. Ceci vient corroborer les résultats de Grunberger *et al.* (1994) montrant que sur la kaolinite, les observations directes mettent en évidence la conservation des tailles de particules grâce aux forces interfoliaires importantes qui empêchent toute déformation des particules de kaolinite. Donc nous prendrons des particules de taille constante malgré les pressions au niveau des pores qui augmentent et nous regarderons dans ce qui suit les distributions porales à chaque niveau structural.

Distribution porale des particules en suspensions

Dans la microstructure des argiles, Al-Mukhtar *et al.* (1996) identifient trois différents types d’espace poral (micropores, mésopores et macropores). L’identification est basée sur les recherches menées par Touret *et al.* (1990) et Tessier *et al.* (1992) sur les classifications des tailles des pores. Cela donne : (i) les pores de l’ultrastructure de taille entre $(0,001 - 0,0025)\mu\text{m}$. Ils

sont appelés intra-particule ou alors inter-feuillets, représentés par l'espace interfoliaire entre les feuillets d'une particule c'est-à-dire à l'intérieur d'une particule primaire. L'espace est généralement occupé par les couches d'eau adsorbées (1 à 4) et des cations échangeables (*e.g.* les smectites). À une échelle plus grande, (ii) les micropores représentés par l'espace interparticulaire ou bien alors intra-agrégat. Il est de taille entre $(0,0025 - 0,15)\mu\text{m}$. L'espace est susceptible de diminuer jusqu'à atteindre la valeur de l'espace interfoliaire pour les argiles fortement compactées. Enfin, (iii) à l'échelle des macropores, il est défini par l'espace inter-agrégat à partir d'une taille des pores supérieure à $0,15\mu\text{m}$ ou bien $0,2\mu\text{m}$, où l'eau circule librement (l'eau libre).

Distribution des tailles de particules

L'essai de filtration consiste à faire passer des particules fines à une concentration donnée constante à travers le sable. Le premier critère pour observer le phénomène de piégeage des particules dans les pores est la taille de la particule et sa forme. La figure 2.19, nous donne la distribution de la taille des particules de la kaolinite. Étant donné que les particules d'argiles ont des tailles inférieures à $80\mu\text{m}$, deux techniques de mesure peuvent être employées : par sédimentométrie (la courbe de Wahyudi, 1991) ou par granulomètre laser (la courbe de Hammad, 2010).

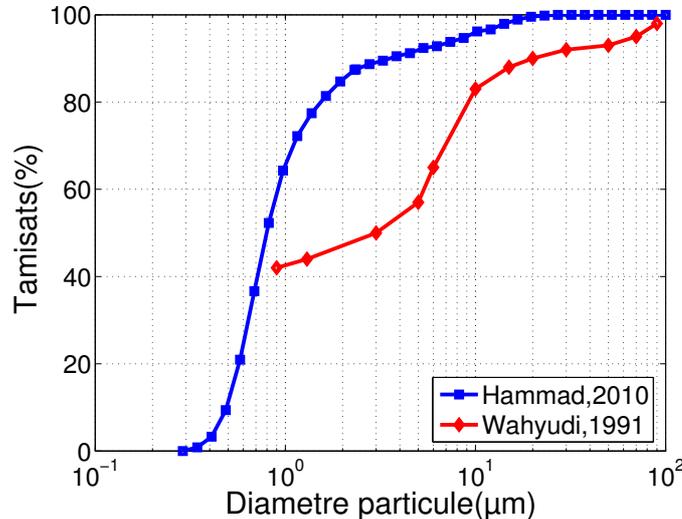


Figure 2.19 – Courbes granulométriques de la kaolinite P300 (d'après Hammad, 2010; Wahyudi, 1991).

La courbe de distribution des tailles par granulomètre laser donne des précisions plus importantes que la sédimentométrie sur la fraction $< 1\mu\text{m}$. La P300 se compose de 83% de particules de taille $< 2\mu\text{m}$. Afin de s'assurer de cette méthode d'identification, Hammad (2010) a fait

des observations microscopiques sur des particules d'argiles préparées de la même manière que celles passées au granulomètre laser. À partir de là, il en a estimé la distribution des tailles par des traitements d'images. Les résultats des deux traitements sont en bon accord.

Pour la suite des interprétations nous prendrons un diamètre de la kaolinite à partir de la distribution fréquentielle (Figure 2.20a) et de la courbe granulométrique laser (Figure 2.20b).

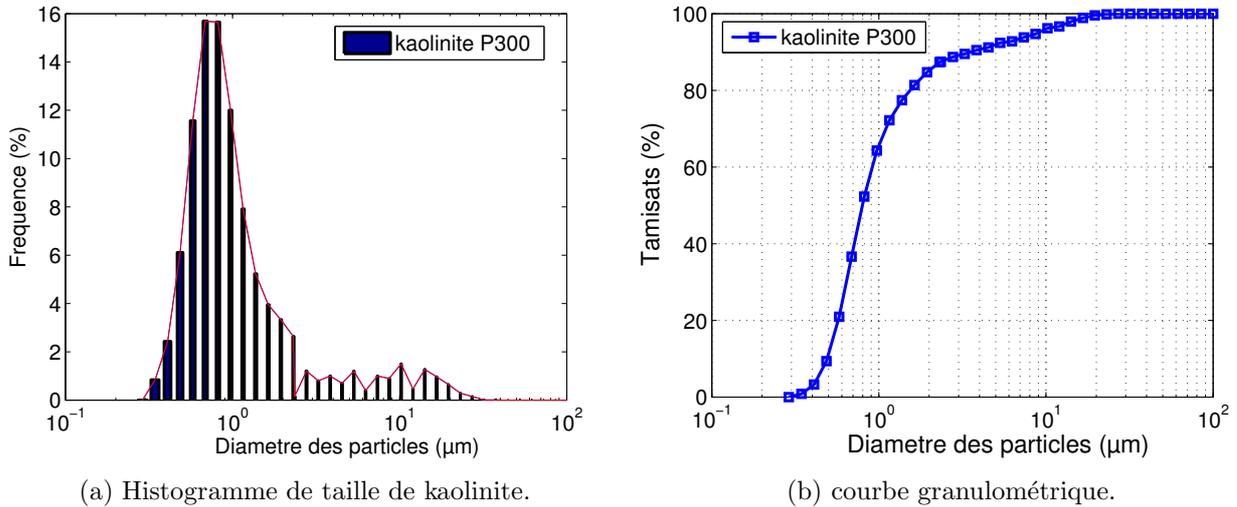


Figure 2.20 – Distribution de la taille de particules de kaolinite P300 (d'après [Hammad, 2010](#)).

2.5.3 Critère de pénétrabilité

Afin de réussir une filtration, il faut une condition à satisfaire : le diamètre des plus grosses particules à injecter (quand celles-ci ne sont pas homogènes), doit être inférieur au plus petit pore du milieu afin de s'y introduire. Autrement, un blocage mécanique peut se produire et ainsi une obstruction des pores est engendrée. Pour cela, il existe des critères de pénétrabilité. Dans les conditions idéales pour des particules solides sphériques qui constituent un arrangement régulier du milieu et sans les conditions physico-chimiques, il suffirait d'assurer la relation suivante :

$$r_{particule} \leq R_{accès,pore} \quad (2.6)$$

Cependant, les particules en suspensions ne sont pas sphériques, le milieu poreux n'est pas homogène, la distribution des pores n'est pas régulière, des frottements et des forces attractives-répulsives peuvent intervenir. Pour cela, [Bortal \(2002\)](#) lors d'une étude de l'injection des coulis de ciment dans des colonnes de sables a rajouté un coefficient de sécurité c , qui prendrait en

compte la variation de la taille des pores par rapport à la taille représentative des particules de ciment ainsi que l'irrégularité de la forme des grains et des pores. L'équation 2.6, deviendrait :

$$r_{particule} \leq c \cdot R_{accès, pore} \quad (2.7)$$

Ainsi le critère de pénétrabilité établi par Bortal (2002) tient compte de l'indice des vides, la taille des particules du milieu poreux et la taille des particules injectées. Le critère est formulé comme suit :

$$d_{95ciment} \leq \frac{1}{1,55} \cdot a \cdot D_{15,sol} \quad (2.8)$$

$$d_{95particle} \leq \frac{1}{1,55} \cdot a \cdot D_{15,filter} \quad (2.9)$$

avec la variable a qui dépend de l'indice des vides du milieu :

$$a = 1,183 \cdot e^2 - 1,127 \cdot e + 0,4293 \quad (2.10)$$

Sachant que le sable est représenté par son D_{15} et le ciment par son d_{95} , e est l'indice des vides et c est égale à 1/1,55.

Ce critère prédit qu'un ciment d'un diamètre représentatif $d_{95ciment}$ n'est injectable dans un milieu granulaire dont le diamètre représentatif est le $D_{15,sol}$ que si la condition dans l'équation 2.9 est bien vérifiée. Par une étude basée sur les résultats d'infiltration (application aux barrages) et des analyses statistiques des essais de laboratoire existants, Honjo et Veneziano (1989) ont désigné un critère empirique de rétention des fines dans les filtres non cohésifs. Cette approche est basée sur le critère de Terzaghi.

$$\frac{D_{15,filter}}{d_{85}} \leq 5,5 - 0,5 \frac{d_{95}}{d_{75}} \quad (2.11)$$

Sachant que les d_{95} , d_{85} , d_{75} représentent les diamètres des tamis qui laissent passer respectivement 95 %, 85% et 75 % des particules fines, les diamètres sont extraits de la courbe granulométrique (Figure 2.20b). Ce critère peut être utilisé uniquement s'il vérifie la condition suivante :

$$\frac{d_{95}}{d_{75}} \leq 7 \quad (2.12)$$

Ils estiment aussi ne pas avoir suffisamment de données pour des valeurs du rapport supérieur à sept.

Ces critères de pénétrabilité nous donnent uniquement des prévisions sur la filtration des particules dans un milieu granulaire poreux, pour quelques essais d'injectabilité appliqués dans les cas des coulis de ciment ou bien dans les filtres de barrages. Cependant ces critères ne prendraient en compte que l'aspect géométrique des particules et des pores. Néanmoins, ils ne tiennent pas compte de la concentration des particules à injecter qui pourrait changer la taille des particules fines dans les critères et cela par un arrivage simultané de plusieurs particules fines. Les particules fines qui circulent simultanément dans le milieu peuvent former des pontages qui bloqueraient l'entrée des pores. Ajouté à cela, les aspects chimiques d'attraction-répulsion peuvent survenir entre les particules et le milieu granulaire. Ces interactions ne doivent pas être négligées dans les critères de pénétrabilité.

2.6 Incertitude sur les mesures

En métrologie, chaque mesure est accompagnée d'une estimation d'erreur. Ceci prend en compte la fiabilité des instruments et la répétabilité des mesures. Généralement on reconnaît trois sources d'erreur : la précision de l'appareil, la dispersion statistique et l'erreur systématique. Ces erreurs peuvent ainsi introduire des variabilités ou des incertitudes sur les valeurs mesurées. Par ailleurs notre matériau (*i.e.* sable hétérogène en termes de tailles et de formes des grains) a une variabilité naturelle inhérente qui engendre une incertitude de type aléatoire. Il se trouve que la procédure de mise en place (*i.e.* hauteur de chute, quantité) introduit également une incertitude supplémentaire.

L'estimation de l'incertitude sur les mesures expérimentales est donc un point très important. Dans notre cas elle relève des conditions de mise en place expérimentales, de la fiabilité des instruments de mesure et de la répétabilité des mesures.

2.6.1 Gammadensimétrie

Les causes d'erreurs de la densité tout le long des éprouvettes de sable sont nombreuses, elles sont dues essentiellement au caractère aléatoire de l'émission radioactive et de la précision du coefficient d'absorption. L'hétérogénéité du sable (*e.g.* forme, taille) introduit d'autres types d'incertitudes. L'objectif est d'analyser les causes d'erreurs et de déterminer l'incertitude sur la densité.

Les causes d'incertitude sur la densité du matériau le long de la colonne sont dues à la granulométrie du sable variant de 0,3 à 2mm, aussi à la hauteur de chute de 90cm de la colonne qui se réduit au fur et à mesure du remplissage. Par ailleurs, les causes d'erreurs dues à l'opérateur ne seront pas prises en compte.

Les instruments de mesure sont aussi une source d'erreur qui se rajoutent. Premièrement, le gammadensimètre dispose d'une source radioactive césium 137 dont l'émission de rayon gamma est aléatoire. Deuxièmement, l'environnement dans lequel s'effectuent les mesures de gammadensimétrie, car les résultats sont sensibles à la température et l'humidité de la salle d'essai. Les principales sources d'erreurs que l'on peut retenir dans nos mesures sont causées par les matériaux choisis et les appareillages utilisés, tel que : Les erreurs de mesure dues à la colonne et au matériau sont :

- L'épaisseur d du matériau traversé (diamètre de la colonne) qui peut avoir quelques imperfections ;
- L'excentricité de la colonne cylindrique par rapport à l'axe du rayonnement gamma ;
- Le déplacement à la verticale du banc de gammadensimétrie à l'aide de petits moteurs.

Les erreurs de mesure dues à l'appareillage et à l'environnement sont :

- L'incertitude sur le coefficient d'absorption massique calculé pendant l'étalonnage de 3 matériaux (sable, eau, argile).
- Le changement de température durant l'essai qui influence l'absorption des photons dans le matériau saturé et l'absorption dans l'air.

2.6.2 Estimation des incertitudes de mesure de la densité

Les mesures de densité peuvent se faire soit sur un point fixe dans la colonne, par exemple à l'entrée de l'injection, soit en faisant des balayages à l'aide d'un moteur situé dans le banc gamma-densimétrique (profils de densité de toute la colonne). Cela nous amène à avoir deux types d'incertitude sur un point fixe ou sur plusieurs points (le déplacement de la source radioactive amplifie l'erreur).

Le caractère aléatoire de l'émission radioactive nous contraint à effectuer un temps de comptage suffisamment long pour que les émissions se stabilisent. Dans le cas de mesure pour un seul point dans la colonne (gammadensimètre fixe), le temps de comptage est de 1mn. Dans le cas de mesure des profils de densité, le déplacement est de 2cm et le temps de comptage dans chaque arrêt est de 5mn, cela nous donne une bonne stabilisation pour un coefficient de variance de 0,05% sur la densité, c'est-à-dire un écart type de $0,001\text{g/cm}^3$ dans notre cas.

Les incertitudes de mesure des profils de densité sont causées par les divers facteurs (cités plus-haut). On montre ici l'erreur sur la mesure de la densité pour une colonne remplie de sable en condition saturée et à température contrôlée. En faisant plusieurs balayages avec le banc gamma-densimétrique, on estime les incertitudes de mesure pour chaque point de la colonne et on trouve un écart-type entre $0,0065\text{-}0,019\text{ g/cm}^3$ selon la position de mesure, soit une moyenne de $0,012\text{g/cm}^3$. La figure 2.21 présente un profil de la densité et son intervalle de l'écart-type

en chaque hauteur de mesure pour l'essai S1.

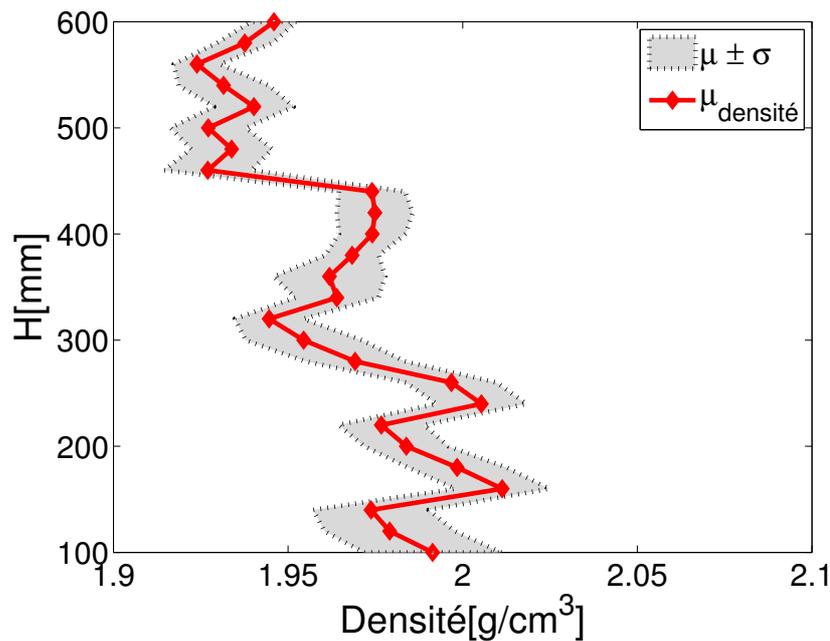


Figure 2.21 – Incertitudes de mesure de la densité le long de la colonne.

Dans le cas de notre étude, la densité dans la colonne varie due à l'hétérogénéité des couches de sable. Ainsi, on trouve une densité moyenne de la colonne de $1,96\text{g/cm}^3$ et un écart-type de $0,02\text{g/cm}^3$ sur l'ensemble des points de mesure. Cet écart de mesure peut varier d'un essai à l'autre suivant les arrangements des grains de sables.

2.7 Synthèse sur les essais de filtration des particules fines à réaliser

Dans des colonnes en laboratoire, le transport de particules fines d'argile de $1\mu\text{m}$ de diamètre dans un milieu hétérogène de sable de diamètres variant entre 0,3 et 2mm a été étudié. L'appareillage se trouve dans une pièce isolée où la température est contrôlée à 20°C . Un mélange d'eau et d'argile d'une concentration constante fixée à $0,5\text{g/l}$ est injecté en continue pour chaque essai. De l'eau courante est utilisée, d'un pH basique de 7,7 et d'une conductivité électrique de $551\mu\text{S/cm}$ ¹. Les conditions expérimentales utilisées dans cette étude, principalement le choix des matériaux sont : (i) le milieu poreux, du sable propre de quartz chargé négativement et (ii) les particules fines constituées principalement de kaolinite P300 et une faible présence de particules d'Illite chargées négativement. Les interactions répulsives entre le milieu et les

1. Syndicat des eaux d'Ile-de-France, <http://www.sedif.com/>

particules doivent conduire à un minimum d'immobilisation (*i.e.* conditions physico-chimiques défavorables pour le dépôt). De ce fait, le dépôt des particules fines dans les pores est principalement causé par le blocage physique. Cependant, [Porubcan et Xu \(2011\)](#) évoquent que dans les milieux naturels tel que le sable, il n'est pas exclu que les deux phénomènes de fixation : *straining* (dépôt de particules dans des pores trop étroits pour les laisser passer) et *attachement* physico-chimique (fixation due à des interactions D.L.V.O) puissent apparaître simultanément.

2.8 Conclusion

Les essais de filtration de particules fines dans un milieu modèle simplifié comme les billes de verres sont assez bien connus. Néanmoins, les phénomènes de transport et de dépôt dans des milieux poreux granulaires comme le sable (influence de la taille des particules sur la distribution porale initiale) restant peu étudiés, notre choix s'est porté sur du sable hétérogène avec des surfaces rugueuses. Dans ce chapitre le dispositif expérimental ainsi que les différentes techniques de mesure et de caractérisation des matériaux sont présentés mettant en évidence leur diversité. Une combinaison des différentes techniques contribue à mieux comprendre la formation du dépôt à l'échelle locale et les différentes porosités pouvant être rencontrées dans le cadre de cette étude (Figure 2.22). Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats de l'évolution de la perméabilité et de la porosité obtenus dans les différentes conditions expérimentales testées.

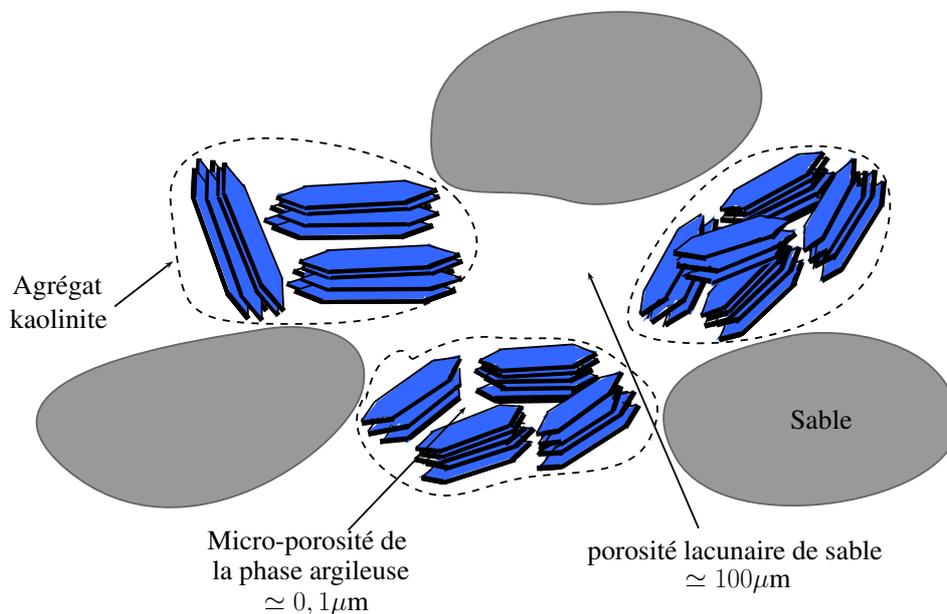


Figure 2.22 – Composition de l'espace poral constitué par les agrégats de kaolinite et les particules de sables.

Chapitre 3

Résultats et interprétation des essais

Sommaire

3.1	Introduction	63
3.2	Résultats des essais expérimentaux	65
3.2.1	Essais de perméabilité	65
3.2.2	Profils de densité	72
3.3	Modèle de perméabilité	74
3.3.1	Modèle de Hazen-Taylor	75
3.3.2	Modèle de NAVFAC DM7	76
3.3.3	Modèle de Kozeny-Carman	76
3.3.4	Modèle de Chapuis	77
3.4	Évolution de la perméabilité	80
3.4.1	Évolution de la porosité	81
3.4.2	Détermination de la surface spécifique	92
3.4.3	Évolution de la surface spécifique	94
3.5	Conclusion	111

3.1 Introduction

Le transport des polluants dans les milieux naturels souterrains est contrôlé entre autres par les hétérogénéités du milieu qu'ils peuvent rencontrer. Durant ces dernières décennies, de nombreuses études ont examiné les effets des polluants (*e.g.* tailles, concentration, densité) du milieu naturel, ainsi que les conditions sur le fluide (*e.g.* pH, débit, densité, force ionique), afin de contrôler et de comprendre les conditions qui régissent le transport et le dépôt dans les pores. Ces études ont largement contribué à la compréhension de l'influence des propriétés des

particules fines, des propriétés physiques des fluides et de la vitesse du fluide sur la réduction de la perméabilité du milieu. Néanmoins, peu d'études montrent l'évolution de la perméabilité dans les différentes couches du milieu poreux et l'influence de la porosité hétérogène des couches sur les processus de dépôt et de transport des particules fines.

Le milieu poreux granulaire bien qu'hétérogène, lorsqu'il est saturé, s'il n'est pas soumis aux variations de forces de contacts importantes, peut être considéré comme un milieu indéformable. Par conséquent, il comporte un volume constant occupé par des particules qui forment le squelette (dans notre cas du sable) et un volume des vides, qui est initialement occupé par de l'eau. Au cours d'un essai de filtration, des particules de petites tailles en suspension sont injectées en continu dans le milieu. Elles vont pénétrer dans les pores dont la distribution de la forme est non uniforme. Dans certaines régions du pore, la vitesse de l'eau est très faible. Autrement, ces endroits peuvent être considérés comme des zones d'écoulement immobiles, dans lesquelles une partie des particules va être déposée autour des collecteurs ou bien piégée dans des gorges de pores qui ne permettent pas le passage des particules et l'autre partie des particules fines va être transportée vers d'autres pores le long de la colonne sujette au même processus de piégeage. Le dépôt des particules va se traduire par une restructuration géométrique des pores et cela va engendrer une diminution des volumes de pores, donc la diminution de la porosité, ce qui affectera la perméabilité du système de filtration.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux résultats des essais de filtration et le colmatage des milieux poreux choisis. Idéalement, on aimerait pouvoir réaliser des essais de filtration en regardant l'influence de plusieurs facteurs (*e.g.* la concentration des particules fines, la taille des particules fines, la taille et la densité des particules du filtre, le débit d'injection, le pH et la force ionique), ajouté à cela, les types de filtration occasionnés (*i.e.* filtration en formation de cake en surface, filtration en profondeur, filtration transverse et filtration moyenne). Seulement, cela est difficile à réaliser à partir d'un certain nombre d'essais limité. L'objectif de notre étude met en avant l'influence de quelques facteurs sur le transport et le dépôt des particules fines au sein d'un milieu poreux par filtration en profondeur. Nous présenterons les résultats des expériences de la filtration réalisées dans des colonnes de laboratoire en mettant l'accent sur :

- L'effet de l'hétérogénéité locale du milieu poreux initial (*i.e.* diamètre des grains, porosité et distribution des tailles des pores).
- Les conditions hydrodynamiques : dont la vitesse de l'écoulement.

Un banc gamma-densimétrique doté d'un moteur, nous permet d'enregistrer des profils de densité le long de la colonne durant tout un essai. Ceci nous fournit le suivi du transport et du dépôt des particules fines dans le milieu poreux à chaque instant, la porosité est alors calculée en faisant quelques hypothèses.

A la fin de chaque essai, des prélèvements sont effectués à différentes profondeurs de la co-

lonne. Ces prélèvements sont préalablement préparés par des techniques de séchage permettant ainsi de faire des observations microscopiques et des essais de porosimètre à mercure. Le but des essais microscopiques est d'avoir des informations sur les diamètres d'accès des pores encore pénétrables et d'observer la forme des dépôts par le biais des images MEB. Enfin, des modèles phénoménologiques seront développés afin d'interpréter les valeurs de perméabilité dans les différentes sections d'une colonne de sable. Ceci est accessible en prenant en compte la variation de la porosité dans le milieu, la distribution granulométrique du squelette de sable, la forme du dépôt et la variation de la tortuosité.

3.2 Résultats des essais expérimentaux

3.2.1 Essais de perméabilité

Pour comparer plus facilement les différents essais avec plusieurs débits, différentes granulométries et porosités (Tableau 3.1), les courbes obtenues sont présentées sous forme adimensionnelle :

- K/K_0 , représente l'évolution de la perméabilité, soit le rapport de la perméabilité mesurée durant l'essai sur la perméabilité initiale.
- ρ/ρ_0 , de même pour le rapport de densité, sachant que ρ est la densité à chaque instant et ρ_0 est la densité initiale.

Pendant la durée d'un essai, le débit d'injection de l'eau chargée en particules fines reste constant et l'injection se fait en continue. En imposant un débit constant, nous essayons d'éliminer le dépôt et le réentraînement de particules dûs uniquement à des changements brutaux de débit « impulsions » durant un essai. Les travaux de [Herzig et Goff \(1972a\)](#) montrent cet effet de l'intensité des impulsions sur le réentraînement des particules en fonction de leurs tailles. Par ailleurs, dans les travaux de [Kretzschmar et al. \(1997\)](#) ainsi que les travaux de [Benamar et al. \(2007\)](#), ils réalisent des injections de particules par des pas de pulsations, c'est-à-dire une injection discontinue des volumes de particules dans le milieu afin d'obtenir un colmatage avec une cinétique linéaire du premier ordre. Ce choix permet aussi de laver plus facilement le milieu et de recommencer d'autres essais dans le même milieu.

Les travaux de thèse de [Courcelles \(2007\)](#), réalisés au sein du laboratoire MSSMat, préconisent un débit constant pour des essais de filtration de particules au laboratoire. En effet, dans le cas de l'application de ses travaux pour les barrières perméables réactives *in-situ*, il réalise des simulations numériques pour détecter différents dysfonctionnements de l'écoulement à travers des portes filtrantes. Cela a démontré que le débit de l'écoulement des eaux souterraines, à travers la porte filtrante reste pratiquement constant tant que la variation de perméabilité

du filtre ne passe pas sous une certaine valeur critique. De ce fait, il recommande d'appliquer un débit constant durant les essais au laboratoire afin de déterminer le temps nécessaire pour atteindre cette valeur critique à partir de laquelle il faudra envisager une régénération du filtre.

Dans notre étude, la concentration des particules de kaolinite en suspension injectée est maintenue constante durant l'essai, elle est prise égale à 0,5g/l pour tous les essais. Les travaux antérieurs sur le phénomène de la filtration de particules fines ont montré que la concentration était un facteur important dans l'évolution de la perméabilité. En effet, les concentrations importantes font chuter plus rapidement le rapport de perméabilité (K/K_0) (Reddi *et al.*, 2000; Moghadasi *et al.*, 2004). Par ailleurs, les concentrations définissent aussi le type de filtration étudiée. Pour de fortes concentrations, la formation d'une masse de particules à l'entrée du filtre sera très fortement envisageable (*i.e.* filtration à la surface), dans ce cas, la filtration avec formation de cake est étudiée. Dans le cas d'étude d'une filtration en profondeur, Ghidaglia (1994) préconise des concentrations inférieures ou égales à 0,5g/l pour des particules de tailles inférieures à 10 μ m. Les particules injectées peuvent ainsi pénétrer et circuler dans les différentes couches en profondeur pour ensuite s'y déposer. À partir de cela, dans notre étude de filtration en couches profondes, nous imposons une concentration de 0,5g/l constante pour tous les essais.

Le tableau récapitulatif 3.1, regroupe tous les essais réalisés pour les différentes granulométries et les différents débits. La porosité ϕ_0 présentée est la valeur moyenne, calculée à partir des profils de densité mesurés au gammadensimètre. La perméabilité initiale K_0 est calculée à partir d'un essai réalisé sur la colonne de filtre à l'aide d'eau distillée (voir en détail dans la section 2.3, figure 2.4a). En faisant varier le débit et en enregistrant la pression différentielle entre l'entrée et la sortie de la colonne, nous avons calculé la perméabilité en utilisant la loi de Darcy. Les filtres sont constitués de sable de différentes granulométries, les diamètres des grains de sable varient entre (0,315 – 2)mm. Nous les avons classé sous plusieurs catégories en fonction de leurs diamètres, ce qui nous donne une première classe de particules fines dont le diamètre varie entre (0,3 – 0,6)mm (Gf), une seconde classe de taille moyenne avec des diamètres entre (0,63 – 1)mm (Gm) et une troisième classe de taille grossière avec des diamètres entre (1 – 2)mm (Gg). Les granulométries des filtres constitués de chacune des classes précédentes sont considérées serrées (S). Enfin une dernière classe est constituée de particules fines dont le diamètre est entre (0,315 – 1)mm avec une distribution plutôt étalée (E) et qui regroupe les deux premières classes. Par ailleurs, le choix de ces diamètres de filtres est régie par les gammes de mesure que le capteur de pression différentielle est capable d'enregistrer. Si nous prenons des diamètres trop grands, les perméabilités seront trop faibles, ce qui se traduit par des mesures de pression différentielle trop petites qui peuvent être dans la gamme d'erreur du capteur. Cela dit, les particules trop fines sont aussi susceptibles de générer des pressions différentielles trop importantes et qui seront en dehors de la fourchette mesurable par le capteur.

Table 3.1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques et valeurs expérimentales des différents filtres.

Propriétés physiques	S1 Gf-S	S2 Gf- E	S3 Gf- E	S4 Gf- E	S5 Gg-S	S6 Gm-S	S7 Gf-S	S8 Gf-S
dg[mm]	0,315-0,63	0,315-1	0,315-1	0,315-1	1-2	0,63-1	0,315-0,63	0,315-0,63
q [ml/mn]	100	100	60	30	100	100	100	100
ϕ_0	0,42	0,39	0,32	0,32	0,4	0,36	0,4	0,48
K_0 [cm/mn]	1,23	3,96	2,1	3,18	22,5	8,57	3,1	2,5

* *S : sable, G : granulométrie, f : fine ; g : grossière, m : moyenne, E : étalée, S : serrée*

Les résultats de la perméabilité se présentent sous la forme de K/K_0 en fonction du volume d'eau injecté V_{inj} . Nous allons représenter l'évolution de la perméabilité mesurée en fonction du nombre de volume de pores nVp qui a traversé l'échantillon. Le volume des pores Vp permet d'introduire la porosité initiale du milieu, $nVp = V_{inj}/Vp = V_{inj}/(\phi_0 \cdot V_T)$.

Les résultats engendrés lors d'un essai de filtration de particules de kaolinite en suspension sont représentés dans la figure 3.1. Nous obtenons simultanément des enregistrements sur l'évolution de la pression différentielle et sur l'évolution de la densité. La courbe bleue représente l'évolution de la perméabilité globale de la colonne. En utilisant les enregistrements de la pression différentielle entre l'entrée et la sortie de la colonne, la perméabilité est directement calculée en appliquant la loi de Darcy. La courbe verte représente l'évolution de la densité dans un seul point de la colonne en fonction du nombre de pores injectés. Le rapport de perméabilité K/K_0 diminue durant l'essai, avec une chute rapide jusqu'à un nombre de volume de pore égale à 400, ensuite la chute de perméabilité continue avec un taux de chute moins important, jusqu'à se stabiliser à nVp égale à 800. Parallèlement la densité augmente par l'injection des particules fines en continue. L'augmentation est assez rapide au départ jusqu'à un nVp de 400, succédée d'une phase à moindre dépôt jusqu'à un nVp égale à 600 à partir de laquelle nous observons un palier (dépôt maximale de particules atteint).

Les résultats de l'essai de filtration avec le sable de la même granulométrie mais à différents débits sont montrés dans la figure 3.2. Pour chaque essai, les colonnes de sables sont préparées de nouveau selon la procédure de la mise en place choisie (voir section 2.3). Le faible débit augmente la pente de la chute de perméabilité au départ, ensuite l'évolution de la perméabilité se stabilise quand elle arrive à une diminution de 80%. Nous pouvons voir que le débit d'injection des particules affecte le taux de chute de la perméabilité K/K_0 , donc le colmatage des pores est plus important pour un faible débit (S4). Autrement, le changement de perméabilité en fonction du débit se traduit par une réduction de la probabilité de dépôt de particules au début de l'essai pour les débits élevés. Les résultats de la figure 3.2 sont en accord avec la

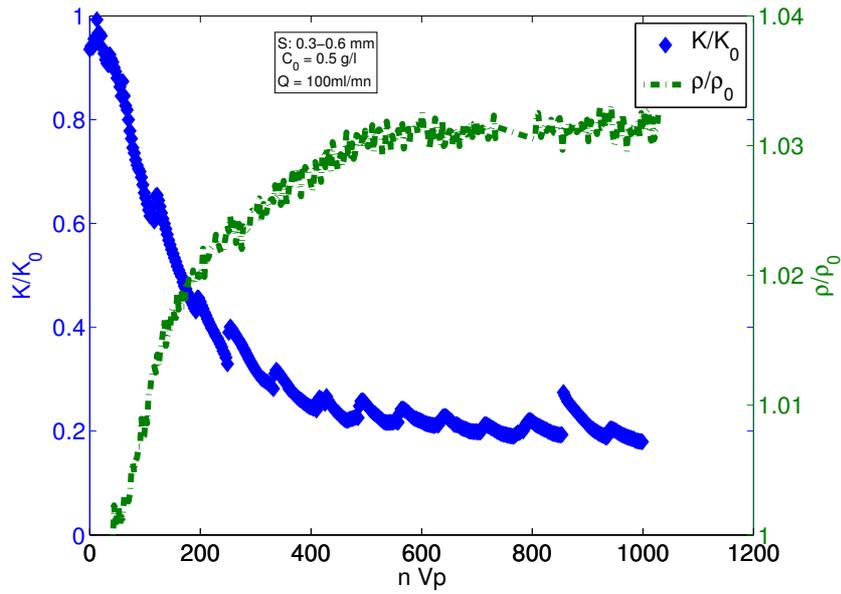


Figure 3.1 – Les paramètres accessibles pour un essai de filtration.

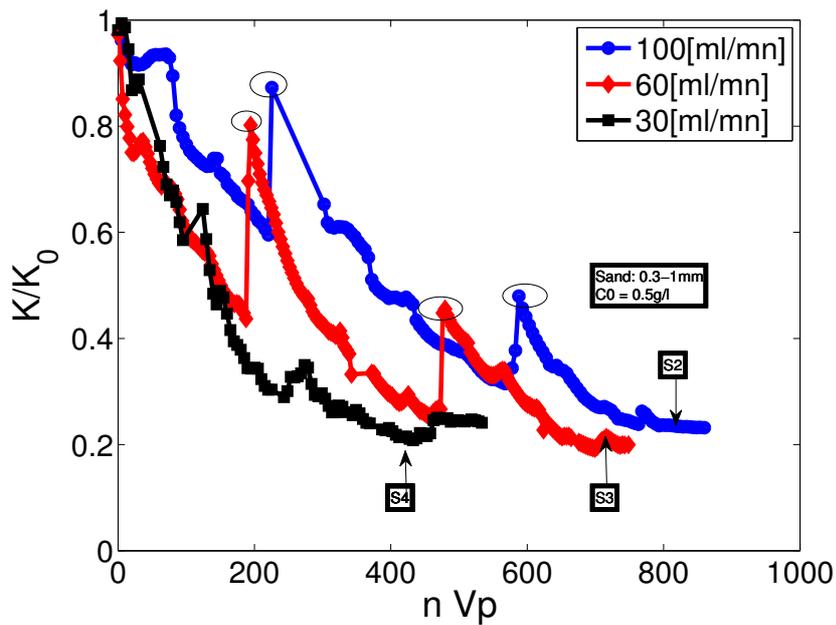


Figure 3.2 – Évolution du rapport de la perméabilité pour différents débits.

littérature (Reddi *et al.*, 2000; Compère *et al.*, 2000) où il est suggéré que cet effet correspond à une diminution des forces hydrodynamiques par rapport aux forces d'interaction de van der Waals et de la double couche. Lorsque les forces de nature physico-chimiques sont suffisamment fortes, leur influence domine par rapport aux forces hydrodynamiques.

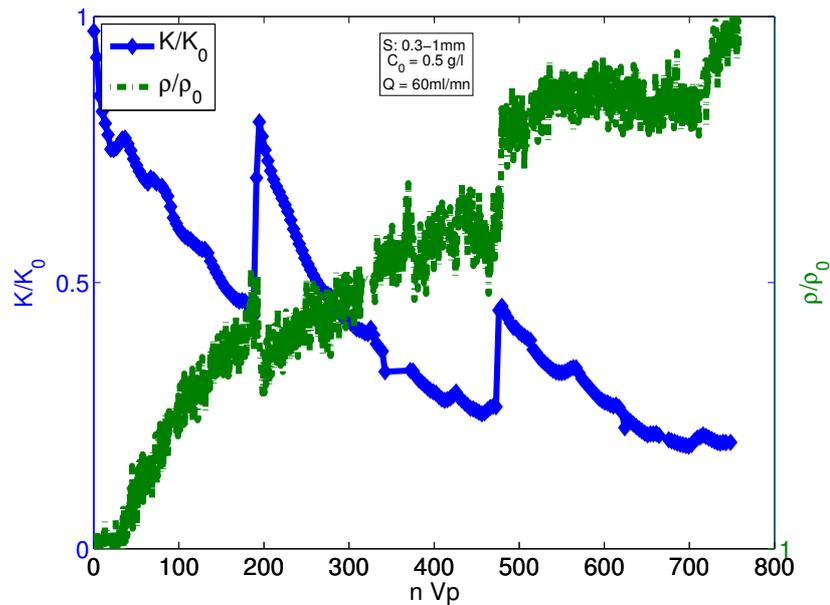


Figure 3.3 – Évolution simultanée du rapport de la perméabilité et du rapport de la densité à l'entrée de la colonne (essai S3).

Nous pouvons aussi voir sur les courbes (S2 et S3) des augmentations brusques et répétitives dans l'évolution de la perméabilité obtenue. Ces points de changement soudain, nous les avons entourés par des cercles dans la figure 3.2. Nous avons pris un des essais, l'essai S3 avec le débit de 60ml/mn que nous retraçons dans la figure 3.3, avec l'évolution de la densité à l'entrée de la colonne afin de mieux comprendre les chutes de pression différentielle. Nous remarquons que ces points de flexion sont accompagnés par un changement dans la densité du milieu. Ceci correspond à un relargage brutale des particules, dû essentiellement à des turbulences dans le volume en suspension injecté. On explique cela par des dysfonctionnements durant l'essai, soit par des arrêts brutaux de la pompe ou soit par des pompages à vides qui entraînent des entrées de bulles d'air.

La figure 3.4 montre pour un même débit, l'effet de la granulométrie et de la porosité initiale sur l'évolution de la perméabilité. Aucune différence notable n'a été observée, soit dans les taux de chute de perméabilité, soit à l'ampleur totale de la réduction du taux de perméabilité. Néanmoins nous remarquons une légère différence pour le test S7 sur le taux total de réduction. Comme dit précédemment, les forces hydrodynamiques régies par le débit influencent le dépôt des particules, lequel ne permet pas dans ce cas d'étude d'observer une différence notable sur la chute de perméabilité et le colmatage entre les différents filtres étudiés.

Nos tests peuvent être comparés à d'autres essais expérimentaux sur des filtres de sables et dans les mêmes conditions expérimentales (débit constant de 100ml/mn et concentration en kaolinite égale à 0,5g/l). Reddi *et al.* (2000) effectuent les essais avec un sable de construction

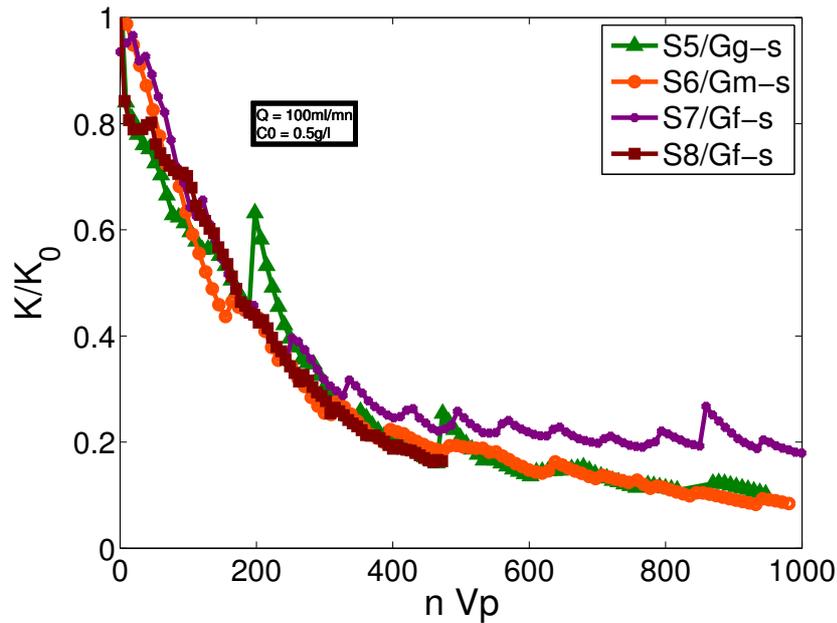


Figure 3.4 – Évolution du rapport de la perméabilité dans les différents milieux poreux pour les mêmes conditions d’injection.

et [Alem *et al.* \(2009\)](#) réalisent les essais avec un sable de Seine lavé. La différence entre les essais réside dans la taille des colonnes et le sens de l’écoulement, l’essai de [Reddi *et al.* \(2000\)](#) se déroule au sein d’une colonne horizontale de dimensions (64mm de longueur et 76mm de diamètre intérieur). Les essais d’[Alem *et al.* \(2009\)](#) sont réalisés dans une colonne verticale de (400mm de hauteur pour un diamètre intérieur de 41mm). Nos essais sont effectués dans des colonnes verticales de dimensions (900mm de hauteur pour un diamètre intérieur de 100mm). Nous observons dans la figure 3.5 la même tendance de diminution de taux de perméabilité, seulement, à partir de $150nV_p$ le taux de diminution de la courbe de [Reddi *et al.* \(2000\)](#) est légèrement plus important. Cela se traduit par le nombre des vides encore disponibles dans le milieu poreux, étant donné que notre colonne est plus longue, les pores encore accessibles sont plus importants, ainsi une diminution de perméabilité globale moins importante est constatée. De ce fait, les dimensions d’une colonne d’étude sont très importantes. On constate qu’au début des essais et jusqu’à $40nV_p$, la différence entre les dimensions des colonnes déjà évoquée auparavant n’est pas bien distinguée. Finalement, les colonnes d’essais trop petites ne permettent pas d’obtenir suffisamment d’informations sur les différentes couches dans le milieu et le changement de l’espace poral dans ces couches, donc pas assez d’informations sur l’évolution de la cinétique du dépôt.

Dans ce volet expérimental, nous avons enregistré des profils de la densité afin d’étudier les changements des volumes des vides dans la colonne et d’étudier la cinétique du dépôt. La chute

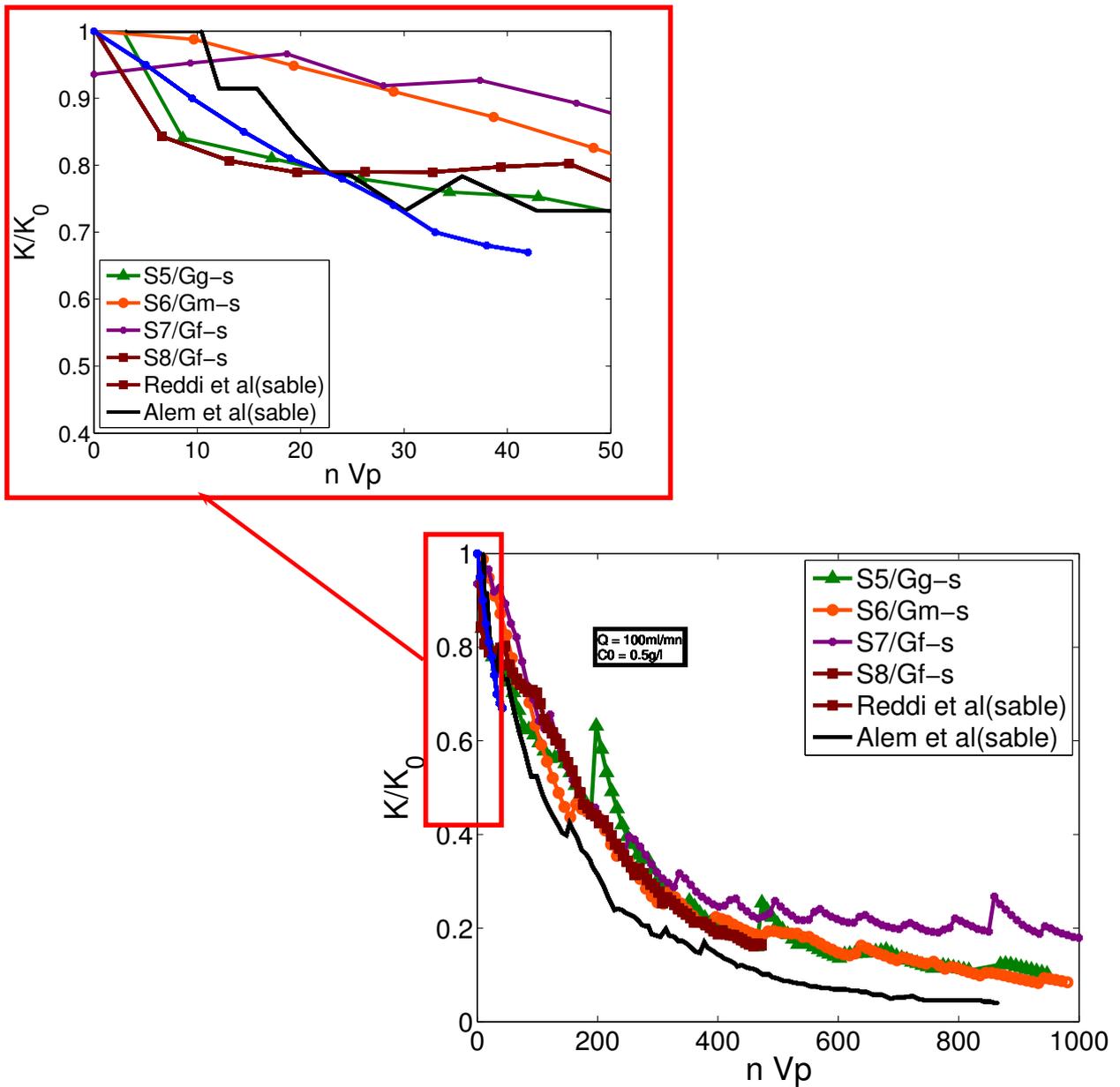


Figure 3.5 – Évolution du rapport de la perméabilité dans différents milieux poreux.

de la perméabilité est liée à l'évolution de la porosité. Nous allons analyser dans ce qui suit l'évolution des densités qui sont distinctes dans les différents filtres.

3.2.2 Profils de densité

Au cours des essais d'injection, nous avons réalisé des profils de densité à différents moments durant un essai. Les enregistrements sont obtenus par gammadensimétrie, repartis sur différents points de mesure le long de l'axe de la colonne H (une mesure chaque 2cm). Le temps de comptage pour chaque point a été de 15 minutes. L'évolution des divers profils de densité sont présentés dans la figure 3.6. Les profils initiaux de la densité montrent une hétérogénéité des milieux poreux testés. Le suivi de la densité permet moyennant certaines hypothèses d'obtenir l'évolution de la matrice poreuse en chaque point mesuré. Pour tous les essais, les particules de la kaolinite parcourent une grande partie de la colonne au début de l'injection. Dans les différents essais réalisés, on constate une augmentation importante de cette densité durant les premiers jours de l'injection et cela est répartie dans tous les points du milieu, le long de la colonne.

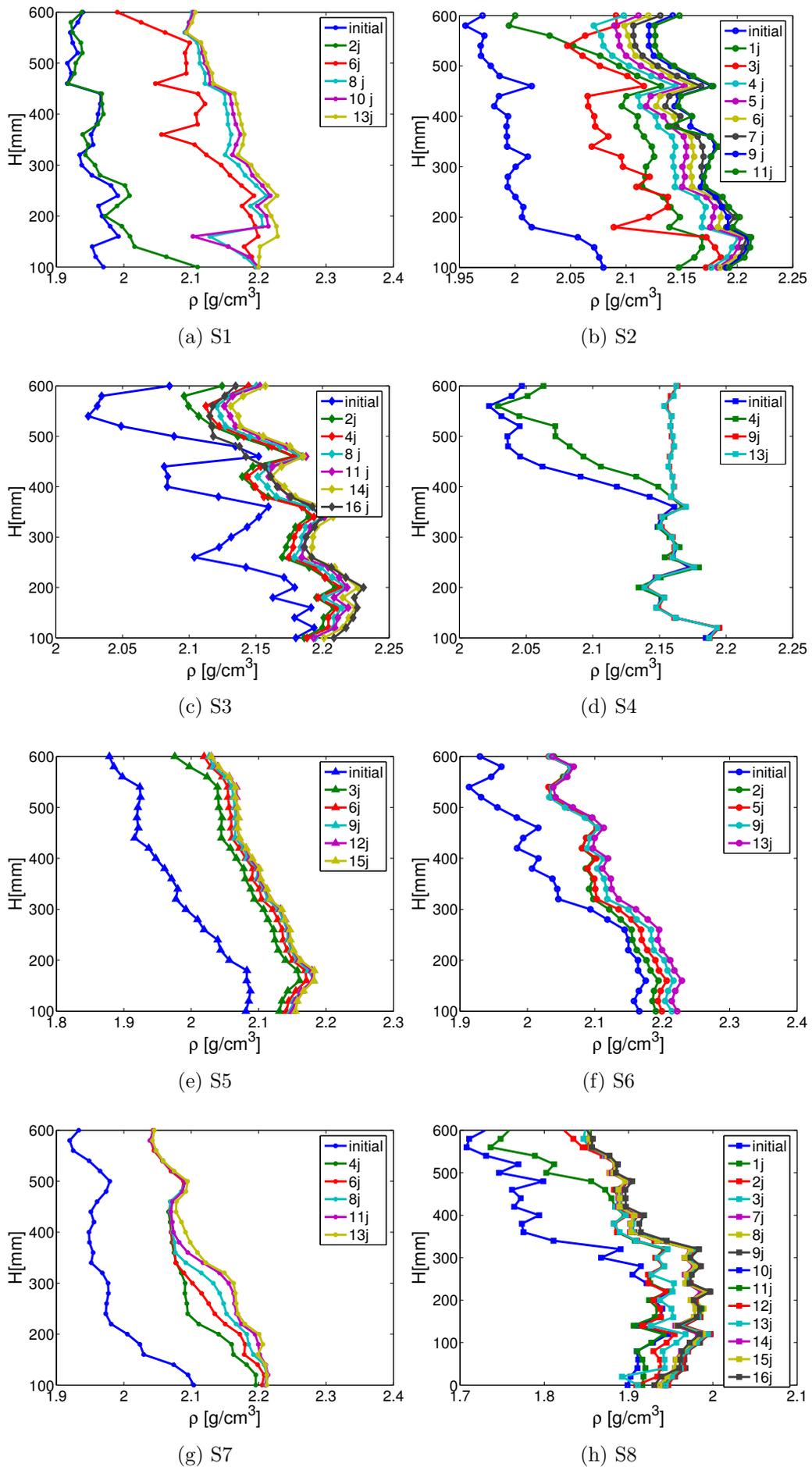


Figure 3.6 – Évolution des densités le long de la colonne pour les différents essais.

3.3 Modèle de perméabilité

Depuis plusieurs siècles les chercheurs tentent de déterminer l'une des propriétés les plus importantes d'un milieu poreux artificiels ou naturels (*e.g.* les sols, le bois, les filtres domestiques et industriels, les céramiques, les poumons et les reins humains), laquelle est la perméabilité cinématique K . La perméabilité cinématique est reliée à la perméabilité intrinsèque du milieu granulaire k par les propriétés du fluide notamment la viscosité μ et la densité $\gamma = \rho_w \cdot g$, tel que $K = \left(\frac{\rho_w \cdot g}{\mu}\right) \cdot k$. La perméabilité k est une caractéristique intrinsèque qui ne dépend que de la structure et de la connectivité des pores qui caractérisent le filtre. Tandis que la perméabilité cinématique K dépend également des caractéristiques du fluide, dont (i) la masse volumique du fluide qui peut être chargée par quelques particules fines, ainsi que (ii) la viscosité dynamique qui varie avec la concentration en particules fines et les fluctuations de la température.

La perméabilité va caractériser la facilité avec laquelle le fluide peut circuler à travers le milieu poreux. En 1880, Seelheim avait déjà écrit que la perméabilité devait être liée à une valeur au carré de diamètre des pores caractéristiques (Chapuis, 2004). Depuis, plusieurs équations de la perméabilité en fonction de la porosité (propriété tout aussi importante) ont été développées afin de prédire la perméabilité d'un matériau saturé $K = F(\phi)$. Cela, par différentes relations empiriques, tels que des modèles capillaires, des modèles statistiques et des théories de rayon hydraulique (Bear, 1972; Chapuis et Aubertin, 2003; Zamani et Maini, 2009, entre autres).

Les modèles les plus courants sont dérivés de la relation semi-empirique bien connue entre la perméabilité et la porosité, proposée par Kozeny (1927) et puis modifiée par Carman (1937). Cette équation de Kozeny-Carman a souvent été adaptée pour différents milieux poreux (*e.g.* assemblage de textile, roches carbonatées, milieux en verre et fibre). Parmi les versions les plus récentes trouvées dans la littérature, nous citons les travaux sur l'approche d'une géométrie fractale des espaces poraux (Civan, 2001; Costa, 2006; Xu et Yu, 2008; Henderson *et al.*, 2010).

Par ailleurs, pour un milieu granulaire, Chapuis (2008) énumère quatre modèles de perméabilité qui peuvent être utilisés pour déterminer la perméabilité saturée :

- Le modèle de Hazen-Taylor, utilisé uniquement pour les sables ;
- Le modèle de Naval Facilities Engineering Command (*Navfac 1974*), utilisé pour les sables et les graviers ;
- Le modèle de Chapuis (2004), utilisé pour les sols naturels non plastiques ;
- Le modèle de Kozeny-Carman dont la prédiction de la perméabilité est applicable pour les sols non cohérents (sable, gravier) et les sols plastiques telles que les argiles (Chapuis et Aubertin, 2003).

Les trois premières méthodes sont à éviter dans le cas des sols plastiques (Chapuis et Aubertin, 2003). Pour les besoins de l'étude, nous regarderons le développement des quatre modèles et les

conditions d'application de chacun (Tableau 3.2). Ensuite nous appliquerons les modèles sur les filtres granulaires propres afin de les comparer avec la perméabilité mesurée K_m en utilisant la loi de Darcy .

3.3.1 Modèle de Hazen-Taylor

Il y a un siècle de cela, Hazen (1911) avait développé une équation empirique afin de prédire la perméabilité d'un sable ou d'un gravier propre saturé. L'application de ce modèle exige de répondre à trois conditions d'application :

- Compacité lâche (la porosité doit être à son maximum) ;
- Coefficient d'uniformité inférieur à 5 ($Cu = d_{60}/d_{10} < 5$) ;
- Diamètre d_{10} entre 0,1 et 3mm ($0,1 < d_{10} < 3$) mm.

Chapuis (2004) rapporte que l'équation de Hazen pour une température de 5°C s'écrit :

$$K = d_{10}^2 \quad K \text{ en [cm/s]} \quad (3.1)$$

où le diamètre du grain d_{10} est en [mm] (Hazen, 1911; Taylor, 1948). Si les trois conditions ne sont pas remplies, l'équation 3.1 n'est pas précise. Par ailleurs, il est difficile de donner les erreurs d'estimation et l'écart type toléré.

Chapuis (2008) fait référence à une équation de Hazen plus détaillée qui serait l'équation originale. Nous allons nous pencher sur cette équation qui prendrait en compte les changements de la température, auxquels nous sommes confrontés dans des mesures *in-situ* qui diffèrent des mesures au laboratoire. Cette équation serait définie ainsi :

$$K = 1,157 \cdot d_{10}^2 \cdot [0,7 + 0,03 \cdot T] \quad K \text{ en [cm/s]} \quad (3.2)$$

avec la température de l'eau T en degré Celsius. L'équation 3.1 usuelle que l'on trouve dans les manuels et qui est appliquée pour les perméabilités *in-situ*, correspond à une température de 5,5°C. Dans les laboratoires, la température de référence avoisine plutôt les 20°C, ce qui revient à écrire l'équation 3.2, pour une porosité maximale, comme :

$$K_{Hazen}(20^\circ C, e_{max}) = 1,5 \cdot d_{10}^2 \quad d_{10} \text{ en [mm]} \quad (3.3)$$

Cette perméabilité K_{Hazen} n'a pas été prédite directement avec la valeur de la porosité ϕ mais plutôt par une condition sur le maximum de la porosité ou bien l'indice des vides e , sachant que $e = \phi/(1 - \phi)$. Il existe plusieurs équations de K prédite par l'indice des vides $K = K(e)$, la plus connue est celle de Kozeny-Carman que nous détaillerons par la suite.

3.3.2 Modèle de NAVFAC DM7

La formule de NAVFAC (1974) (*Naval Facilities Engineering Command design manual DM7*) estime une perméabilité K [cm/s] des sables et des mélanges sable/gravier. Elle est fonction de l'indice des vides e et du diamètre des grains d_{10} . Les matériaux utilisés doivent satisfaire les conditions suivantes :

- $2 \leq C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 12$;
- $\frac{d_{10}}{d_5} \leq 1,4$;
- $0,1 \leq d_{10} \leq 2\text{mm}$;
- $0,3 \leq e \leq 0,7$.

Une fois que les conditions sont respectées, l'équation qui résume l'abaque de NAVFAC est exprimée par :

$$K = 10^{1,291 \cdot e - 0,6435} [d_{10}]^{10^{0,5504 - 0,2937 \cdot e}} \quad d_{10} \text{ en [mm] et } K \text{ en [cm/s]} \quad (3.4)$$

3.3.3 Modèle de Kozeny-Carman

L'équation de Kozeny-Carman, proposée par Kozeny (Kozeny, 1927), puis modifiée par (Carman, 1937) est applicable dans les différents domaines de transport en milieux poreux (*e.g.* chimie, ingénierie, médecine, biochimie). Elle est appliquée à tous les types de sols (*i.e.* plastique ou non plastique). Cette équation est citée dans la littérature sous plusieurs formes (Bear, 1972; Gallo *et al.*, 1998; Davis *et al.*, 2006), la plus répandue nous donne la perméabilité k [m²] qui dépend des caractéristiques intrinsèques du milieu poreux :

$$k(e) = \frac{e^3}{c \cdot (1 + e) \cdot S^2} \quad (3.5)$$

$$k(\phi) = \frac{\phi^3}{c \cdot (1 - \phi)^2 \cdot S^2} \quad (3.6)$$

où S [1/m] est la surface spécifique, c est le coefficient de Kozeny-Carman, il a d'abord été introduit par Kozeny kc pour varier selon la forme géométrique des canaux individuels dans le faisceau des tubes capillaires (Bear, 1972). Par la suite, la notion de tortuosité τ des tubes capillaires a été introduite par Carman, le coefficient de Kozeny-Carman est alors apparu sous la forme actuel qui s'écrit $c = kc \cdot \tau^2$. La tortuosité est définie par $\tau = L_e/L$, où L_e et L sont respectivement la longueur réelle de chemin d'écoulement parcouru par une particule et L la longueur droite ou l'épaisseur d'un échantillon qui constitue le milieu poreux. Afin d'avoir de bonnes approximations de la perméabilité des essais expérimentaux, le coefficient c est définie par Carman équivalent à 5 dans le cas de sphères uniformes. Pour des particules sphériques

bien assemblées, la tortuosité avoisine $2^{1/2}$, ce qui donne un coefficient kc égale à 2,5 (Xu et Yu, 2008).

Yu et Li (2004) proposent un modèle de tortuosité pour une géométrie assez simple dans le cas d'un écoulement dans un milieu poreux. Dans ce modèle, la tortuosité est obtenue en faisant la moyenne de deux configurations idéalisées (*i.e.* particules qui se chevauchent et d'autres pas) pour le chemin d'écoulement possible. L'expression approchée de la tortuosité des chemins d'écoulement dans les milieux poreux est fonction de la porosité du milieu, elle est donnée par :

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \sqrt{1-\phi} + \sqrt{1-\phi} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{1-\phi}} - 1\right)^2 + \frac{1}{4}}}{1 - \sqrt{1-\phi}} \right] \quad (3.7)$$

3.3.4 Modèle de Chapuis

Cette méthode est basée sur les prédictions de Kozeny-Carman (équation 3.5). Chapuis (2004) a estimé la perméabilité K pour des sols naturels non plastique (*e.g.* gravier, sable, limon). Dans un graphe, il a tracé le logarithme de la perméabilité mesurée $\log(K_m)$ en fonction de $\log(X)$. Ce dernier est estimé en prenant les deux équations (3.3) et (3.5), $X = d_{10}^2 \cdot \frac{e^3}{(1+e)}$. L'équation prédictive de Chapuis est extraite de l'ajustement de $\log(K)$ en fonction de $\log(X)$. L'équation prédictive de Chapuis s'écrit alors :

$$K = 2,4622 \cdot \left[\frac{d_{10}^2 \cdot e^3}{1+e} \right]^{0,7825} \quad K \text{ en [cm/s]} \quad (3.8)$$

avec d_{10} en [mm]. Les prédictions de Chapuis tirées de l'équation 3.8 peuvent être utilisées pour estimer la valeur de Kp qui est dans la gamme de 10^{-1} à 10^{-3} cm/s pour les sols non plastiques, pouvant être étendues aux sables vaseux naturels. Ces estimations donnent des rapports de perméabilité allant de la moitié jusqu'au double de la perméabilité mesurée pour les sols naturels qui vérifient le diamètre d_{10} entre 0,003 et 3 mm, ainsi que l'indice des vides e entre 0,3 et 1.

Nous allons voir la validité de chaque modèle appliqué à nos essais. Le tableau 3.2 regroupe les données des différents tests nécessaires, dont : les diamètres utilisés, la compacité des filtres et les conditions d'essais imposées (la température).

En s'appuyant sur les données du tableau 3.2, nous savons d'ores et déjà que la méthode de *Navfac* ne convient pas aux données des essais réalisés. La granulométrie utilisée est trop serrée. Toutefois, nous avons tracé les perméabilités initiales des trois équations prédictives Kp en fonction de la perméabilité mesurée de Darcy Km (Figure 3.7). Nous pouvons remarquer

Table 3.2 – Conditions de validation des modèles prédictifs pour les essais de filtration dans milieu sableux.

Paramètres [mm]	S1/ Gf-S	S2/ Gf- E	S3/ Gf- E	S4/ Gf- E	S5/ Gg-S	S6/ Gm-S	S7/ Gf-S	S8/ Gf-S
d_5	0,32	0,34	0,34	0,34	1,05	0,65	0,32	0,32
d_{10}	0,33	0,36	0,36	0,36	1,12	0,66	0,33	0,33
d_{10}/d_5	1,0313	1,0588	1,0588	1,0588	1,0667	1,0154	1,0313	1,0313
d_{60}	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	1,62	0,5	0,5
$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} [-]$	1,5	1,9	1,9	1,9	1,45	1,2	1,5	1,5
Hazen	les conditions de Hazen sont toutes vérifiées							
Navfac	Cu et e ne sont pas vérifiés pour tous les essais							
Chapuis	les conditions de Chapuis sont vérifiées							
K_{Hazen}/Km	7,9	2,9	5,5	3,6	1,7	13,2	3,1	3,9
$K_{Chapuis}/Km$	6,6	1,8	1,7	1,2	0,9	3,7	2,2	5,4
Les essais complètement saturés ont été effectués dans une température ambiante de 20°C								

que même si certains essais restent dans la gamme des prédictions, la plupart des modèles surestiment la valeur de la perméabilité mesurée. Cette surestimation peut atteindre trois fois la valeur de Km , si la perméabilité est évaluée à partir de l'équation de Hazen appliquée aux sables très lâches. Néanmoins, dans le cas de *Navfac*, aucun essai ne respecte les conditions d'application du modèle, des surestimations sont données allant de trois à soixante quinze fois la valeur mesurée. Par ailleurs, nous observons que le modèle de Chapuis donne des prédictions satisfaisantes pour la majorité des tests.

D'après les modèles précédents et en se basant sur l'équation 3.6 de Kozeny-Carman, nous pouvons considérer que la perméabilité prédite va varier suivant le diamètre des grains représentatif d et la porosité initiale du milieu. Une relation entre la perméabilité mesurée K_m , la porosité et le diamètre des grains est déduite en traçant les mesures de la perméabilité K_m en fonction de $x = \alpha \cdot d^2 \cdot \phi^3 / (1 - \phi)^2$ [m/s], avec $\alpha = \frac{\rho_f \cdot g}{36 \cdot \eta}$ [m/s] une constante et le diamètre est représenté par le d_{10} . La figure 3.8 donne la meilleure approximation de $\log[k_m] = A + \log[x]$. Le coefficient A égale à 0,051 représente dans l'équation de Kozeny-Carman comme l'inverse de c , qui prend en compte la tortuosité et la forme des pores. Sachant que le coefficient c est estimé par Carman variant entre cinq et huit pour des sables de formes sphériques, le coefficient trouvé est trois fois plus important, cela est sûrement dû aux formes plutôt allongées des sables.

Chapuis et Aubertin (2003) citent une autre forme de l'équation de la perméabilité cinématique K [m/s]. Elle est déterminée à partir des propriétés du milieu poreux dont, l'indice des

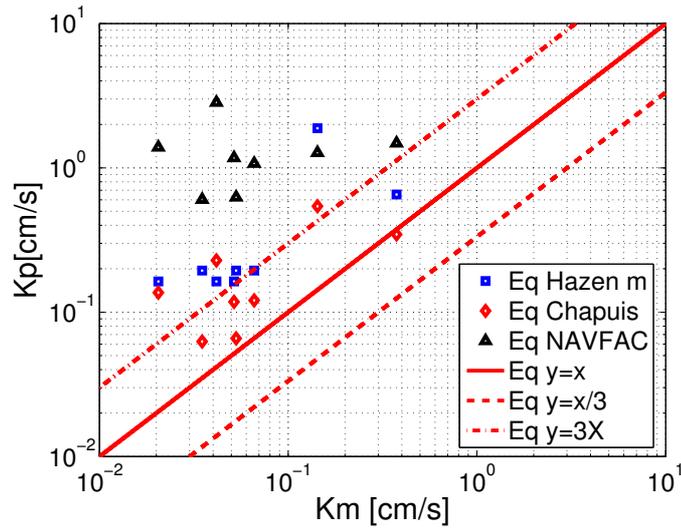


Figure 3.7 – Perméabilité prédite Kp , par les équations 3.3, 3.4, 3.8 en fonction de la perméabilité mesurée Km .

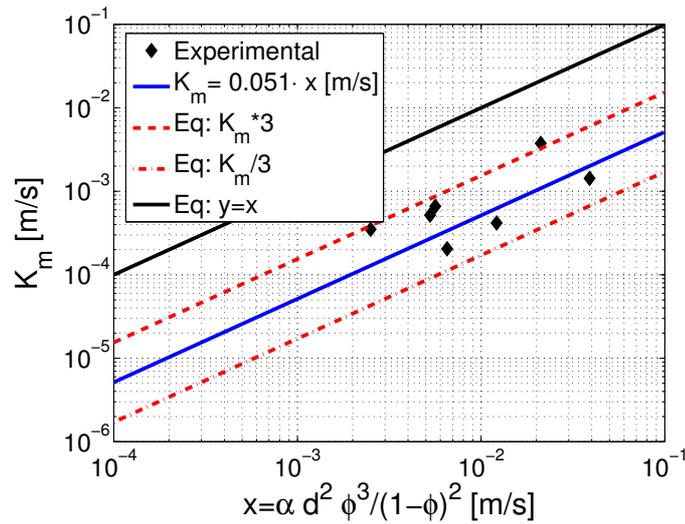


Figure 3.8 – Résultats expérimentaux de la perméabilité mesurée en fonction de x .

vides e , la surface spécifique S_s [m²/kg] et les propriétés du fluide (la densité de l'eau ρ_w et la viscosité dynamique μ_w). Sachant que $K = \left(\frac{\rho_w \cdot g}{\mu_w}\right) \cdot k$, l'équation de Kozeny-Carman s'écrit :

$$K = \frac{g}{D_R^2 \cdot \mu_w \cdot \rho_w} \cdot \frac{e^3}{S_s^2 \cdot c \cdot (1 + e)} \quad K \text{ en [m/s]} \quad (3.9)$$

avec D_R la densité des grains ($D_R = \frac{\rho_s}{\rho_w}$), μ_w la viscosité dynamique [kg/(m · s)] et g la pesanteur [m/s²].

En appliquant l'équation 3.9 sur les essais de sables saturés, nous traçons la perméabilité

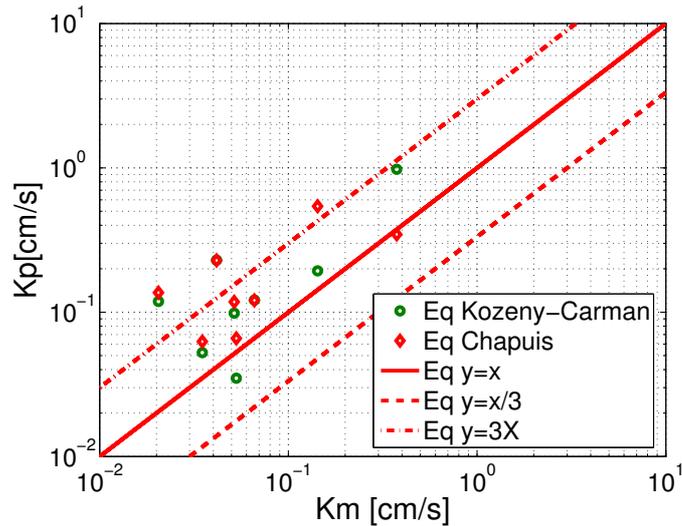


Figure 3.9 – Perméabilité prédite Kp , par les équations 3.6, 3.8 en fonction de la perméabilité mesurée Km .

mesurée Km et la perméabilité prédite par les différents modèles Kp . La figure 3.9, donne l'estimation de la perméabilité en utilisant l'équation de Kozeny-Carman pour des sables propres. Les valeurs de la perméabilité prédite surestiment souvent les valeurs de la perméabilité mesurée, cela est dû essentiellement à la difficulté de déterminer la surface spécifique pour un sol pulvérulent, ainsi que la détermination du coefficient c issu principalement de la tortuosité. Le milieu utilisé est totalement hétérogène, ce qui engendre un manque d'informations sur les formes et les distributions initiales des pores. La méthode de prédiction de Kozeny-Carman est étendue à tous les types de sols, notamment les sols argileux. Elle va nous permettre d'estimer l'évolution de la perméabilité durant un essai d'injection de particules fines argileuses.

3.4 Évolution de la perméabilité

Durant l'injection, une façon d'estimer les changements de la perméabilité consiste à supposer que l'équation de Kozeny-Carman peut être appliquée pour un filtre propre et un filtre colmaté. Moghadasi *et al.* (2004) supposent que l'évolution de la perméabilité dans les domaines pétroliers peut être décrite uniquement par l'évolution de la porosité. Le rapport de la perméabilité est décrit en utilisant l'équation 3.6 :

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 \cdot \left(\frac{1-\phi_0}{1-\phi}\right)^2 \quad (3.10)$$

Cependant cette évolution considère que la surface spécifique ainsi que le coefficient de Kozeny-Carman sont constants durant un essai, or la surface spécifique évolue avec le dépôt des

particules fines. Nous allons nous pencher sur le calcul de la surface spécifique pour différents sites de rétention. Quant à c , il peut être déterminé à partir d'un modèle avec intersection des tubes circulaires (Solymer et Fabricius, 1999).

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^3 \cdot \left(\frac{1-\phi_0}{1-\phi}\right)^2 \cdot \left(\frac{S_0}{S}\right)^2 \cdot \frac{c_0}{c} \quad (3.11)$$

L'équation 3.11 donne la formulation complète de l'évolution de la perméabilité. Dans ce qui suit, nous allons voir comment l'évolution des différents termes de cette relation peuvent être estimés.

3.4.1 Évolution de la porosité

Lors du remplissage d'une colonne, *a priori*, nous ignorons l'arrangement des grains entre eux. La procédure de mise en place (*e.g.* hauteur de chute, humidité, compactage) ainsi que les dimensions des grains, lesquelles jouent un rôle important sur la densité de l'assemblage et que nous pouvons par ailleurs mesurer. Par exemple, un système de pesé peut fournir la densité moyenne de la colonne alors qu'à l'aide d'un gammadensimètre mobile, on a accès au profil de cette dernière. Comme on l'a vu, la porosité est l'un des paramètres importants pour l'étude du transport et du dépôt des particules dans un milieu poreux. Il est par conséquent important d'étudier son évolution. Connaissant la masse volumique des grains solides et de l'eau dans le cas d'un milieu saturé en eau, nous pouvons obtenir le profil de la porosité initiale du milieu ϕ_0 à partir de la densité mesurée. On s'intéresse particulièrement au volume des vides accessibles et disponibles pour l'écoulement du fluide « porosité effective ». Cependant, même si l'on mesure l'évolution de la densité lors de l'injection des particules fines, estimer l'évolution de la porosité effective n'est possible que moyennant quelques hypothèses.

Sachant qu'avant injection le milieu d'une densité ρ_0 est constitué : de grains de sables (volume V_s et de masse $M_s = \rho_s \cdot V_s$ avec ρ_s la densité des grains solides) et des vides remplis d'eau occupant le volume d'eau initiale ($V_v = V_{w0}$ et de masse M_w , où $M_w = \rho_w \cdot V_{w0}$, avec ρ_w la densité de l'eau), on peut obtenir la porosité initiale par :

$$\phi_0 = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s - \rho_w} \quad (3.12)$$

Les particules fines injectées en suspension dans le milieu poreux ont des diamètres inférieurs aux pores. Cela évite des dépôts en forme de cake à l'entrée du milieu et engendre des dépôts dans les diverses couches du filtre. Donc, au fur et à mesure que les effluents contenant les particules fines sont injectés dans le milieu, une partie des particules se dépose et l'autre partie

traverse ce dernier. On peut ainsi distinguer deux catégories de particules fines, les particules déposées que l'on peut considérer immobile : $V_{p_{im}} = \frac{M_{p_{im}}}{\rho_p}$, avec ρ_p densité des particules fines et les particules transportées par le fluide (eau), définie comme la partie mobile : $V_{p_m} = \frac{M_{p_m}}{\rho_p}$. Les molécules d'eau piégées entre les particules immobiles constituent l'eau immobile ($V_{w_{im}} = \frac{M_{w_{im}}}{\rho_w}$) et le reste sera mobile ($V_{w_m} = \frac{M_{w_m}}{\rho_w}$).

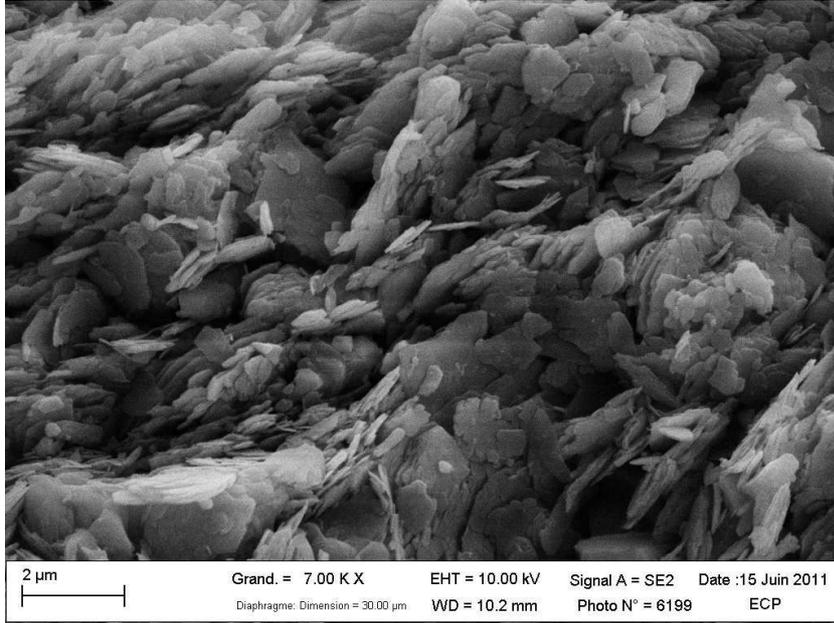


Figure 3.10 – Observation microscopique du dépôt de particules et du volume de vides mort contenu entre les agrégats de particules.

Le volume occupé par les particules immobiles et par l'eau immobile qui se trouve piégée entre ces particules (Figure 3.10) augmente et peut être considéré inaccessible à l'écoulement ; lequel contribuera à la diminution de la porosité effective. [Herzig *et al.* \(1970\)](#) introduisent le paramètre β pour représenter ce volume d'eau mort contenu entre les particules déposées, afin d'estimer l'évolution de la porosité dans le cas de la filtration en profondeur. Le volume immobile cumulé qui traduit la rétention des particules fines et qui va faire réduire la porosité du milieu peut être écrit comme suit :

$$V_{im}^* = V_{p_{im}} + V_{w_{im}} \quad (3.13)$$

$$V_{im}^* = V_{p_{im}} \left(1 + \frac{V_{w_{im}}}{V_{p_{im}}} \right) \quad (3.14)$$

Le volume d'eau immobile entre les particules $V_{w_{im}}$ peut être calculé à partir de la porosité du dépôt $\phi_{dépôt} = V_{w_{im}} / (V_{w_{im}} + V_{p_{im}})$. Cette porosité de dépôt est extraite de l'essai de porosimétrie, en utilisant le volume de mercure introduit dans l'échantillon. De cela, le volume entre les

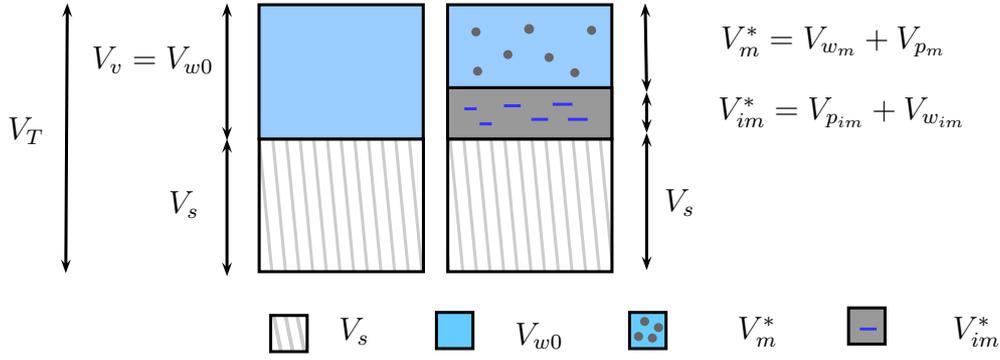


Figure 3.11 – Représentation volumique des constituants d'un échantillon avant et après un essai de filtration.

particules déposées est défini comme étant : $V_{w_{im}} = V_{p_{im}} \cdot \left(\frac{\phi_{dépôt}}{1 - \phi_{dépôt}} \right)$. En introduisant l'expression de $V_{w_{im}}$ dans l'équation 3.14, nous obtenons :

$$V_{im}^* = V_{p_{im}} \left(\frac{1}{1 - \phi_{dépôt}} \right) \quad (3.15)$$

$$V_{im}^* = \beta \cdot V_{p_{im}} \quad (3.16)$$

Connaissant le volume totale de l'échantillon initiale et le volume total pendant un essai (Figure 3.11) ainsi que les volumes des différents constituants ($V_T = V_s + V_m^* + V_{im}^*$), la formulation de la porosité s'écrit :

$$\frac{V_v}{V_T} = \frac{V_m^*}{V_T} + \frac{V_{im}^*}{V_T} \quad (3.17)$$

Le rapport $\frac{V_m^*}{V_T}$, représente la porosité à l'instant t et est basé sur le volume des parties mobiles. Ce rapport du volume occupé par l'eau et les particules immobiles par le volume totale est considéré occuper un volume supérieur au volume réel des particules (équation 3.16), d'où ($V_{im}^* = \frac{\beta \cdot M_{p_{im}}}{\rho_p}$), ce qui donne la formulation de la porosité suivante :

$$\frac{V_v}{V_T} = \frac{V_{w_m}^*}{V_T} + \frac{\beta \cdot M_{p_{im}}}{\rho_p \cdot V_T} \quad (3.18)$$

$$\phi_0 = \phi + \frac{\beta \cdot M_{p_{im}}}{\rho_p \cdot V_T} \quad (3.19)$$

Il nous faut connaître la masse des particules immobiles $M_{p_{im}}$. Pour cela, un banc gammadensimétrique a été utilisé, à partir duquel nous avons les enregistrements de la masse volumique ($\rho = \frac{M_T}{V_T}$), soit la masse totale M_T sur le volume total V_T . La masse totale est constituée de :

$$M_T = M_s + M_{p_m} + M_{p_{im}} + M_w \quad (3.20)$$

où M_s et V_s sont respectivement la masse et le volume du solide. Dans notre cas c'est le sable, les valeurs sont constantes et ils ne changent pas au cours d'un essai.

M_w est la masse de l'eau totale (mobile et immobile). M_{p_m} et $M_{p_{im}}$ sont respectivement la masse des particules en suspension mobiles et la masse des particules immobiles retenues autour d'un grain-collecteur.

A partir de ces informations, nous pouvons évaluer la densité durant un essai d'injection, comme :

$$\rho = \frac{M_s}{V_T} + \frac{M_{p_m}}{V_T} + \frac{M_{p_{im}}}{V_T} + \frac{M_w}{V_T} \quad (3.21)$$

La fraction $\frac{M_s}{V_T}$ est constante durant l'essai, la fraction $\frac{M_{p_m}}{V_T}$ est prise constante durant un essai d'injection, en revanche les rapports $\frac{M_{p_{im}}}{V_T}$ et $\frac{M_w}{V_T}$ sont variables.

En regardant les concentrations massiques du milieu, nous pouvons définir la concentration massique mobile C_m et la concentration massique immobile C_{im} . La concentration massique est définie comme le rapport entre la masse des particules en suspension et le volume d'eau V_{w0} , ce volume d'eau occupe les pores V_v . Les concentrations des particules mobiles et immobiles dans le milieu s'écrivent ainsi :

$$C_m = \frac{M_{p_m}}{V_v} \quad (3.22)$$

$$C_{im} = \frac{M_{p_{im}}}{V_v} \quad (3.23)$$

Depuis l'équation 3.21 et en utilisant les concentrations déterminées dans les équations 3.22 et 3.23, nous obtenons l'expression de la densité :

$$\rho = \rho_s \cdot (1 - \phi_0) + C_m \cdot \phi_0 + C_{im} \cdot \phi_0 + \rho_w \cdot \phi_0 \quad (3.24)$$

Nous allons aussi poser l'hypothèse que les particules immobiles et mobiles sont venues remplacer une partie du volume d'eau dans les pores ($M_w = M_{w0} - V_p \cdot \rho_w$). Étant donné que l'eau et la particule n'ont pas la même densité, nous allons le prendre en compte dans la formulation de la densité totale, soit l'équation 3.24 s'écrit :

$$\rho = \rho_s \cdot (1 - \phi_0) + C_m \cdot \phi_0 + C_{im} \cdot \phi_0 + \rho_w \cdot \phi_0 \cdot \left(1 - \frac{C_{im} + C_m}{\rho_p}\right) \quad (3.25)$$

L'évolution de la densité est écrite en faisant la différence entre l'état initiale et les valeurs de la densité durant la filtration, on obtient :

$$\Delta\rho = +\Delta C_m \cdot \phi_0 + \Delta C_{im} \cdot \phi_0 - \rho_w \cdot \phi_0 \cdot \left(\frac{\Delta C_{im} + \Delta C_m}{\rho_p} \right) \quad (3.26)$$

Si l'on suppose que la concentration C_m reste constante ($\Delta C_m = 0$), on obtient :

$$\Delta\rho = \Delta C_{im} \cdot \phi_0 - \rho_w \cdot \phi_0 \cdot \left(\frac{\Delta C_{im}}{\rho_p} \right) \quad (3.27)$$

La variation de la concentration immobile peut être exprimée comme suit :

$$\Delta C_{im} = \frac{\Delta\rho}{\phi_0 \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_p} \right)} \quad (3.28)$$

Nous utiliserons cette équation pour interpréter nos résultats. Dans le cas où le C_m mobile soit variable, nous rajouterons un terme dans l'équation précédente :

$$\Delta C_{im} = \frac{\Delta\rho}{\phi_0 \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_k} \right)} - \Delta C_m \quad (3.29)$$

Nous pouvons maintenant estimer l'évolution de la porosité, en introduisant l'équation 3.23 dans l'équation 3.19, ce qui nous donne :

$$\phi_0 = \phi + \frac{\phi_0 \cdot \beta \cdot C_{im}}{\rho_p} \quad (3.30)$$

donc une évolution de ϕ , tel que :

$$\Delta\phi = -\frac{\phi_0 \cdot \beta \cdot C_{im}}{\rho_p} \quad (3.31)$$

$$\phi = \phi_0 - \frac{\phi_0 \cdot \beta \cdot C_{im}}{\rho_p} \quad (3.32)$$

L'évolution de la porosité dans chaque point de la colonne est évaluée à partir de l'équation 3.32. Cependant, il nous reste à savoir si le coefficient β est ≥ 1 . Pour cela des observations au microscopique et des essais au porosimètre à mercure vont étayer notre hypothèse de volume mort entre les particules.

Résultats du porosimètre à mercure et des observations microscopiques

A la fin de chaque essai, des prélèvements sont effectués à différents niveaux dans la colonne. Ils seront notés successivement comme tel : H10 est un prélèvement qui est fait à 10cm de

l'entrée de la colonne, jusqu'à $H50$ qui est un prélèvement effectué à 50cm de l'entrée de la colonne (point d'injection des particules). Les matériaux prélevés sont composés d'un mélange de sable et d'argile avec des proportions en volume variables et qui dépendent des dépôts dans les pores. Le sable étant un matériau non cohésif, les quantités différentes d'argiles déposées entre les grains vont assurer une cohésion en formant des ponts distincts entre les grains. Ce qui revient à analyser deux porosités : d'une part, les pores formés par l'espace intergranulaire, d'autre part les pores fins argileux formés par les dépôts. Ces domaines de porosités que l'on avance sont-ils bien distincts et indépendants ? La porosité du dépôt est-elle dépendante de la quantité d'argile et donc de la concentration ?

La figure 3.12, montre les résultats des essais de porosimétrie pour un même sable $S4$. Le diamètre des pores est calculé à partir de la loi de Jurin (équation 2.5). Les courbes représentent les diamètres des pores pouvant être occupés par le mercure injecté sous l'effet de pression croissante. À partir de l'examen des courbes de la distribution volumique cumulative des tailles des pores (dont l'allure est identique), nous pouvons observer que le volume de mercure introduit, suit trois phases qui sont :

- Une première phase d'intrusion de mercure dans laquelle nous pouvons situer les diamètres d'accès de pores entre $400 - 100\mu\text{m}$, c'est une macroporosité. Nous obtenons des courbes d'entrées de mercure quasiment confondues. Ces diamètres d'accès de pores représentent les pores lacunaires entre les particules de sables.
- Une deuxième phase est décrite par un palier entre $100 - 70\mu\text{m}$ du diamètre de pores accessibles. Le palier est traduit par une non intrusion de mercure, donc il n'y a pas de formation de pores dans cette gamme de diamètres.
- Une troisième phase traduite par une seconde intrusion de mercure dans les pores pour toutes les courbes des différents essais. Nous pouvons constater qu'il y a une augmentation du volume de mercure introduit à partir du diamètre d'accès de pore de $0,3\mu\text{m}$, qui sera suivi d'un deuxième palier à partir de diamètre de pores de $0,05\mu\text{m}$.

Par ailleurs, les quantités de mercure introduites dans ces pores semblent être variables d'un prélèvement à l'autre. Elles augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée de la colonne. Néanmoins, le prélèvement $H40$ ne semble pas suivre cet enchaînement. Cela est dû à la quantité d'argile déposée dans les pores, qui peut être plus importante à ce niveau. L'accroissement du volume de mercure introduit dans la première phase semble être plus important à la sortie de la colonne et *vis versa* dans la seconde phase d'intrusion de mercure, où nous remarquons un léger abaissement des volumes introduits à la sortie en comparaison aux volumes de mercure introduits à l'entrée ($H : 10\text{cm}$). Nous pouvons expliquer ces différences de volumes par l'influence des quantités de dépôt d'argile dans les pores, c'est-à-dire, pour un même sable d'un espace poral homogène, les teneurs en argiles importantes vont faire baisser le volume de

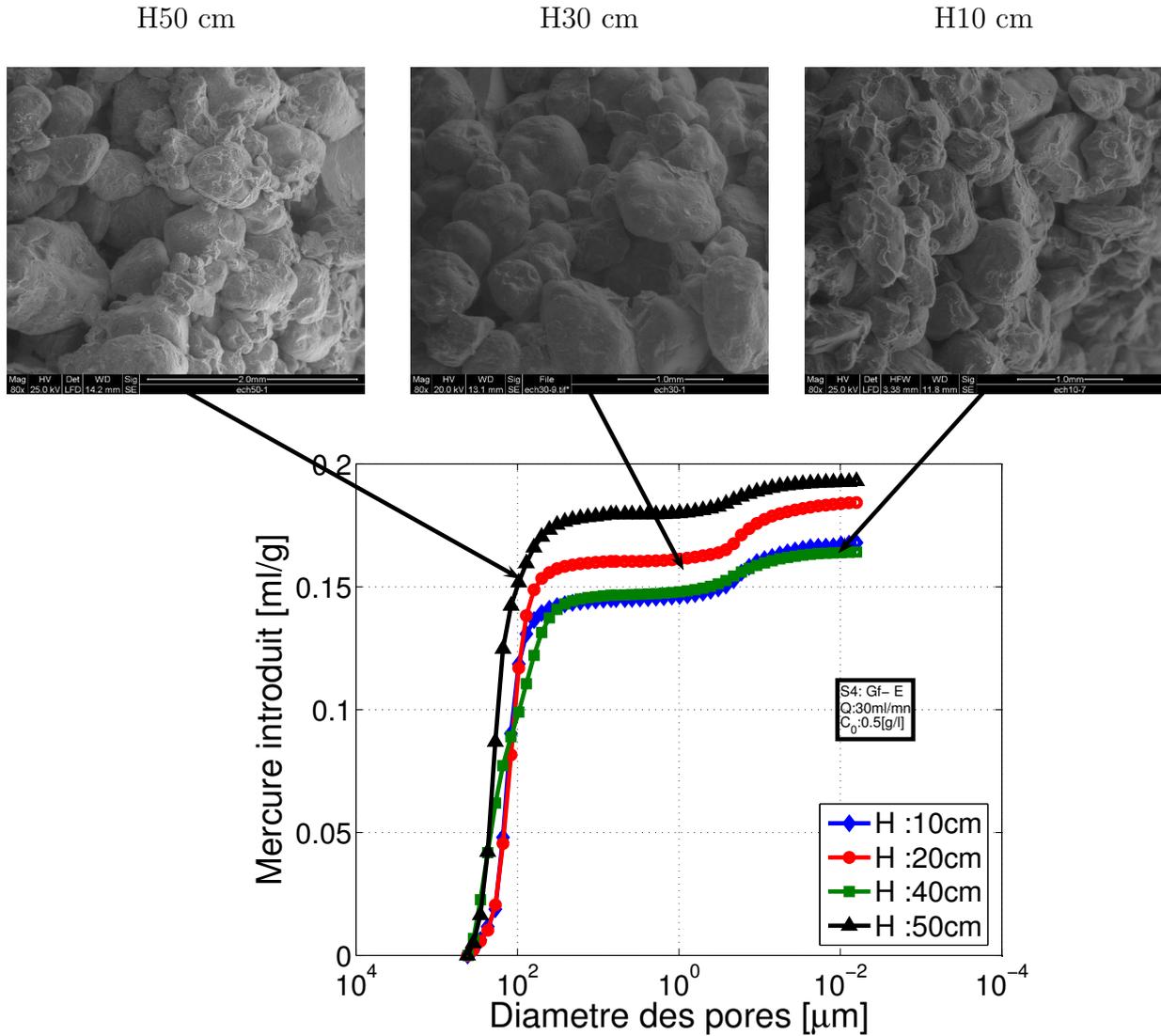
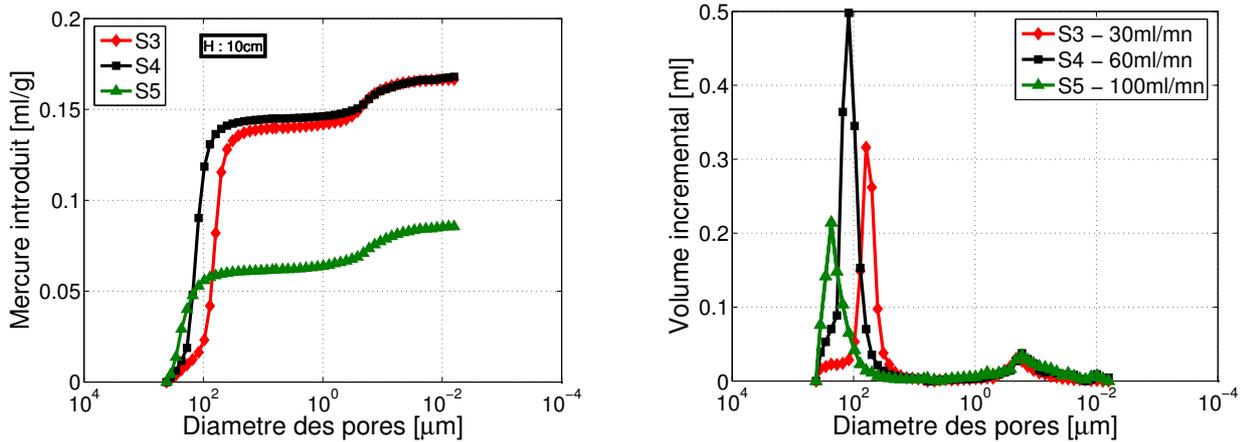


Figure 3.12 – Distribution des tailles des pores : comparaison de différents prélèvements de position H dans la colonne

mercure introduit dans la première phase et faire augmenter la seconde intrusion de mercure dans la troisième phase.

A partir des ordonnées maximales des volumes d'intrusion de mercure pour chaque phase, nous pouvons exprimer la porosité. En observant une double intrusion de mercure, nous affirons la double porosité du milieu. Une première porosité due au squelette de sable et une seconde porosité argileuse due au dépôt d'argile. Pour une meilleure compréhension de la double porosité, des courbes de distribution différentielle par des volumes incrémentaux sont représentées en fonction des diamètres des pores pour les essais S4 et S5 (Figures 3.14 et 3.15). Les pics



(a) Volume du mercure introduit dans les pores pour les différents tests à la même hauteur à 10cm de l'entrée.

(b) Comparaison de la double porosité pour les différents tests à la même hauteur de prélèvements.

Figure 3.13 – Évolution de l'espace poral pour différents essais à la même hauteur : 10cm de l'entrée.

des diamètres des pores pour les sables sont entre 100 et 200 μm concernant l'essai S4 à différents niveaux dans la colonne. Pour le sable S5, l'espace poral est défini par des diamètres des pores entre les particules de sables allant de 200 à 300 μm . Nous constatons que les diamètres des pores représentatifs accessibles au mercure et donc à la pénétration de l'argile sont plus importants dans le cas de diamètre sable-collecteur grossier S5 (Figure 3.13a). Les pics des diamètres de la seconde intrusion sont de l'ordre de 0,18 et 0,2 μm pour tous les essais effectués (Figure 3.13b). Ces diamètres des pores supérieurs à 0,15 μm représentent l'espace inter-agrégats appelé aussi pores intra-particulaires dans la classification d' *Al-Mukhtar et al. (1996)*.

Ces diamètres sont constants et ne dépendent pas de la quantité d'argile déposée, donc nous allons prendre un seul diamètre représentatif pour les pores des dépôts d'argile. N'ayant pas directement les teneurs en pourcentages de l'argile déposée dans le milieu, nous allons déduire la porosité à partir de ce diamètre. Nous allons supposer que la porosité du dépôt ne dépend pas de la quantité déposée. *Hammad (2010)* a réalisé des essais de porosimétrie sur des argiles kaolinite P300 pour différents chargements 35 ; 200 et 1000kPa. Il trouve respectivement des pics de diamètres de 0,25 ; 0,15 et 0,11 μm . À partir des volumes de mercure cumulés et connaissant le volume de l'échantillon, l'indice des vides est calculé pour chaque test. En traçant les indices des vides en fonction des diamètres des pores obtenus par *Hammad (2010)* et en supposant que nous avons la même distribution de pores, nous pouvons déduire l'indice des vides pouvant correspondre à notre diamètre. Pour des diamètres de 0,18 et 0,2 μm nous déduisons respectivement des indices de vides e de 0,67 et 0,7 et donc une porosité de dépôt de $\phi_{\text{dépôt}}$ égale à 0,4. Cette valeur est introduite dans le calcul de β , coefficient qui traduit le volume mort. Dans ce qui suit et dans le calcul de l'évolution de la porosité (équation 3.32)

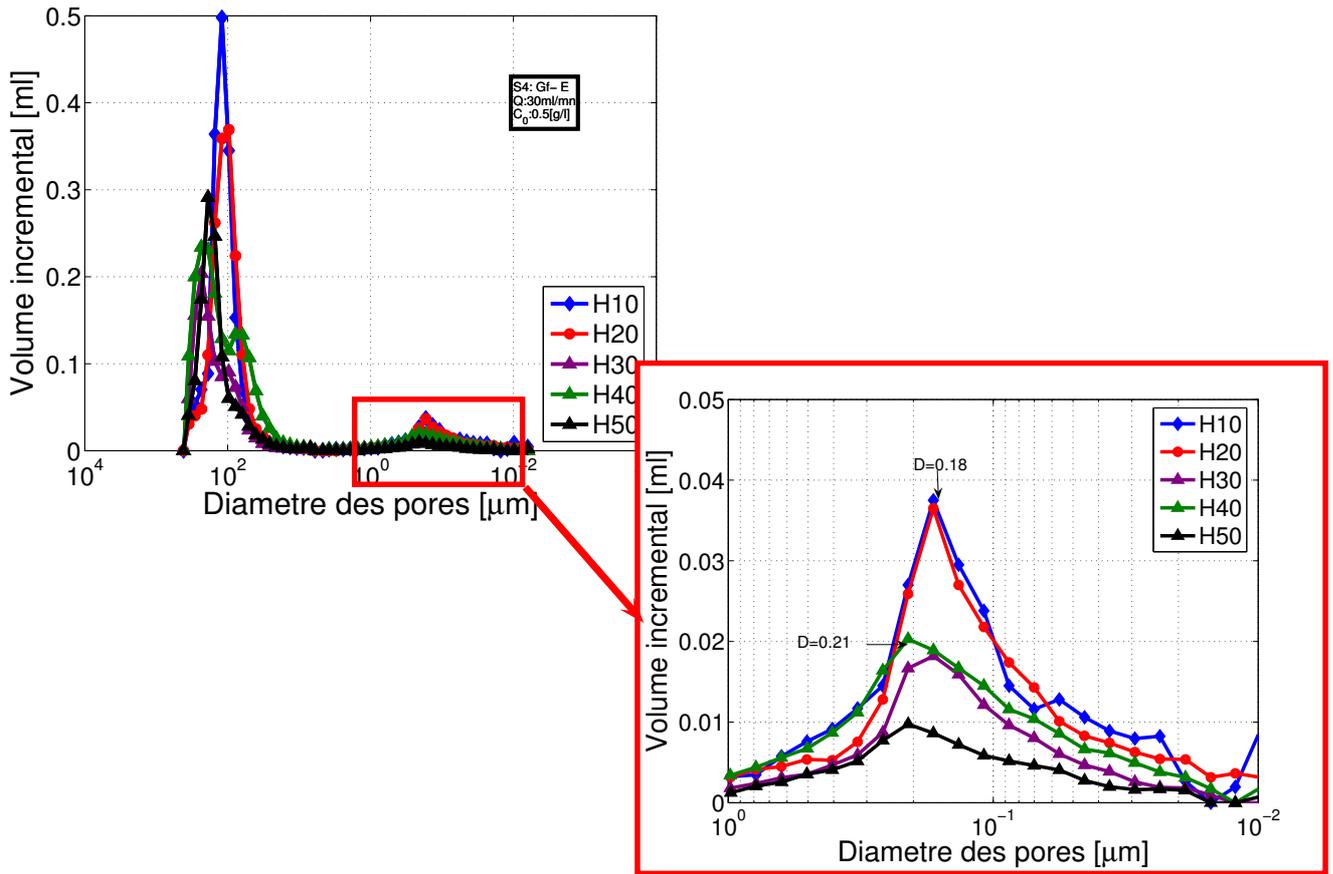


Figure 3.14 – Évolution des diamètres des pores dans différents niveaux de la colonne, figure à gauche : diamètres des pores formés par le sable ; figure à gauche : un zoom sur les diamètres des pores formés par le dépôt d’argile.

nous prendrons un coefficient constant $\beta = 1,7$.

Les graphes dans la figure 3.16, présentent l’évolution des profils la porosité pour chaque essai (Tableau 3.1, pour les caractéristiques de chaque essai).

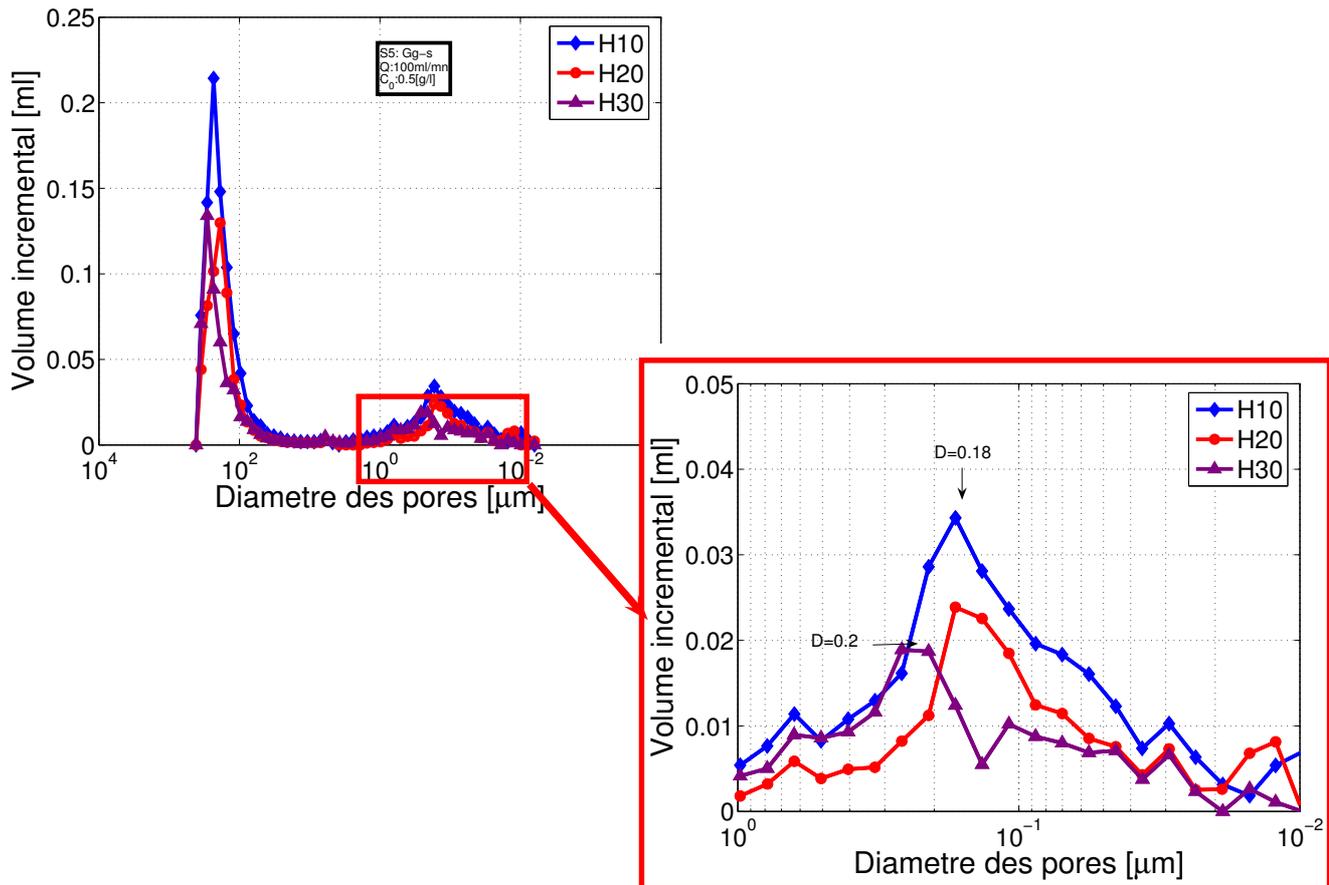


Figure 3.15 – Évolution des diamètres des pores dans différents niveaux de la colonne, test S5.

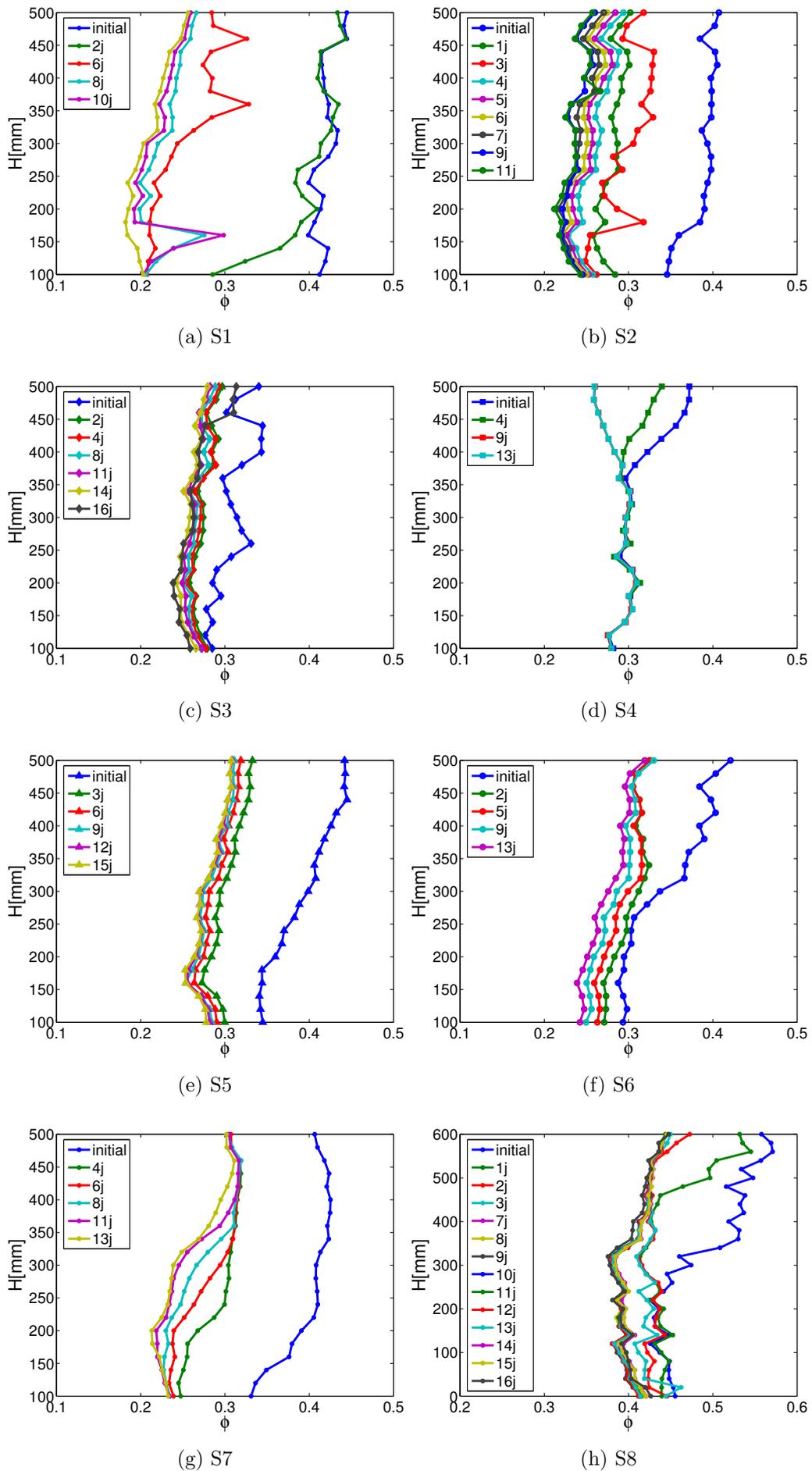


Figure 3.16 – Profils de la porosité (équation 3.32), le long de la colonne pour les différents essais.

3.4.2 Détermination de la surface spécifique

La surface spécifique représente le rapport entre la surface et le volume d'une particule, elle est largement étudiée dans divers domaines de l'industrie, dans lesquelles des relations théoriques sont établies pour la déterminer et cela pour différentes formes géométriques du matériau. Elle peut également être mesurée par plusieurs techniques tels que l'adsorption du gaz ou le bleu de méthylène pour des particules fines de diamètre $d < 80\mu\text{m}$. Cette propriété intervient dans la description de nombreux phénomènes concernant les particules fines.

C'est pourquoi, en mécanique des sols nous trouvons souvent la détermination de la surface spécifique des particules fines plastiques, telles que les argiles, mais nous trouvons rarement des identifications physiques pour la mesure de la surface spécifique des matériaux granulaires de diamètre $d > 80\mu\text{m}$, où les méthodes telles que DRX peuvent être utilisées. La surface spécifique peut être exprimée en $[\text{m}^2/\text{kg}]$ ou bien en $[1/\text{m}]$ indifféremment. Pour des particules sphériques monodisperse de diamètre d_g , la surface spécifique s'écrit comme suit :

$$S_s = \frac{6}{\rho_s \cdot d_g} \quad (3.33)$$

Cette relation peut être généralisée pour l'ensemble de particules n_i de chaque espèce i et du nombre totale de type d'espèce de grains N_m présents dans la solution :

$$S_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} n_i \cdot S_i}{\sum_{i=1}^{N_m} \rho_i \cdot n_i \cdot V_i} \quad (3.34)$$

L'équation 3.34 peut être développée pour des particules sphériques polydisperses en fonction du diamètre d_{g_i} de chaque espèces solides i et de leurs nombres respectifs dans le milieu :

$$S_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} n_i \cdot 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{g_i}}{2}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N_m} \rho_i \cdot n_i \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{g_i}}{2}\right)^3} \quad (3.35)$$

avec, d_{g_i} diamètre des grains d'une espèce i (*e.g.* sable, argile, limon). Pour des matériaux granulaires non plastiques, ce diamètre n'est pas constant. Un diamètre équivalent $d_{g_i}^{eq}$ pour une même surface spécifique doit être évalué. Parmi les méthodes pour déterminer ce diamètre équivalent, nous citons Courcelles *et al.* (2011) qui à partir de la courbe granulométrique de chaque espèce i , ont caractérisé une courbe de probabilité P_i , où $P_i(c)$ représente la courbe de probabilité de rencontrer un grain de la classe c et de diamètre $d_{g_i}^c$, ($1 \leq c \leq n_i$).

$$P_i(c) = \frac{m_i^c}{\sum_{l=1}^{n_i} m_l^c} \quad (3.36)$$

où m_i^c est la masse totale des grains de l'espèce i appartenant à la classe c . Sachant que :

$$m_i^c = \rho_i \cdot n_i^c \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{g_i}^c}{2}\right)^3 \quad (3.37)$$

nous pouvons réécrire la surface spécifique comme :

$$S_s = 3 \cdot \frac{\sum_{c=1}^{n_i} m_i^c \cdot \left(\frac{2}{d_{g_i}^c}\right)}{\sum_{l=1}^{n_i} \rho_i \cdot m_l^c} \quad (3.38)$$

$$S_s = \frac{6}{\rho_i} \cdot \sum_{c=1}^{n_i} \frac{m_i^c}{\sum_{l=1}^{n_i} m_l^c \cdot d_{g_i}^c} \quad (3.39)$$

En introduisant l'équation 3.37 dans la nouvelle expression de la surface spécifique équation 3.39, nous obtenons :

$$S_s = \frac{6}{\rho_i} \cdot \frac{\sum_{c=1}^{n_i} P_i(c)}{d_{g_i}^c} \quad (3.40)$$

Par ailleurs nous avons vu l'expression générale de la surface spécifique pour un grain sphérique. En faisant l'équivalence entre l'équation 3.33 et l'équation 3.40, nous obtenons le diamètre des grains équivalent :

$$d_{g_i}^{eq} = \left(\frac{\sum_{c=1}^{n_i} P_i(c)}{d_{g_i}^c} \right)^{-1} \quad (3.41)$$

Ce diamètre $d_{g_i}^{eq}$ équivalent vient remplacer le d_{g_i} introduit dans l'équation 3.35 pour calculer la surface spécifique. Dans les essais de filtration effectués, nous introduisons deux types d'espèces, le sable pour un diamètre d_g qui est calculé à partir du diamètre équivalent d_g^{eq} (équation 3.41) et l'argile avec un nombre n_p de particules et un diamètre d_{g_p} (représenté en d_p dans ce qui suit). Au cours d'un essai d'injection, un phénomène de dépôt de particules est induit, conséquence la surface spécifique est sujette à des changements qui interviennent dans quelques paramètres qui la composent (n_p, d_g, d_p).

3.4.3 Évolution de la surface spécifique

Au cours d'un essai de filtration, nous avons une partie des particules fines qui se déposent dans le milieu poreux. Afin de déterminer l'évolution de la surface spécifique du milieu lors de la filtration, il est nécessaire d'étudier les différentes configurations de dépôt susceptibles de se produire et qui sont illustrées dans la figure 3.17.

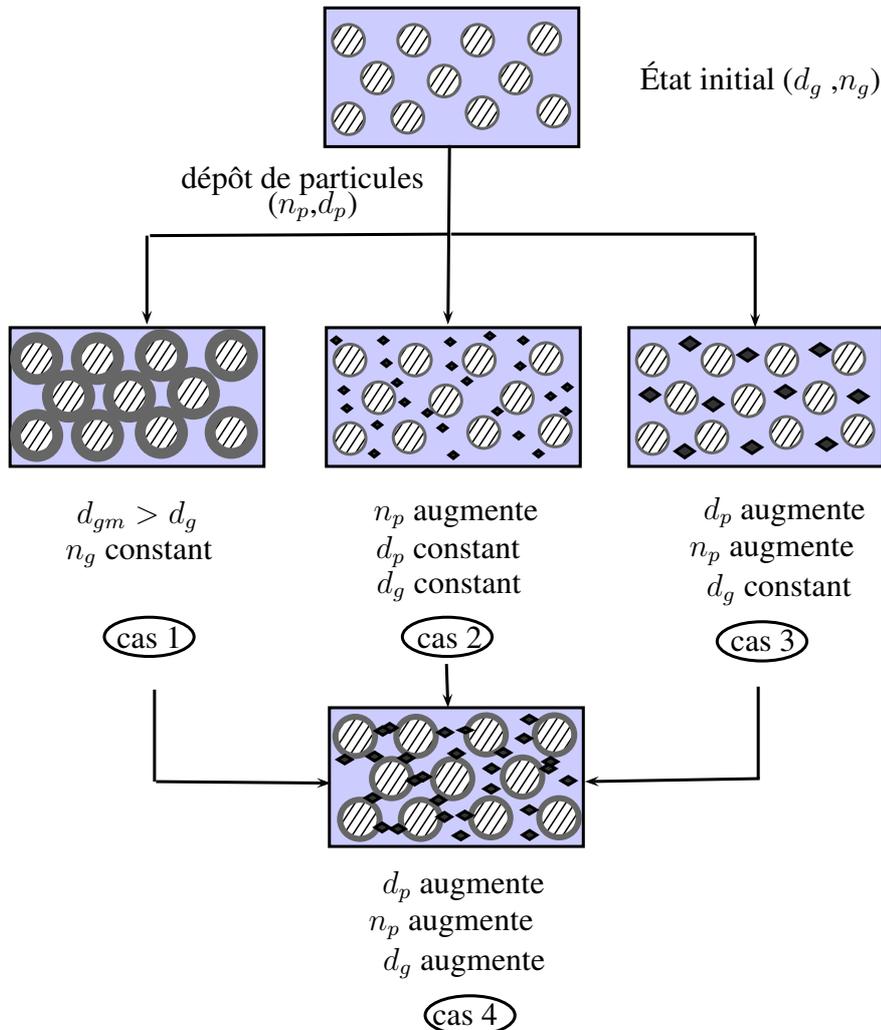


Figure 3.17 – Les différentes configurations de particules fines dans le milieu poreux, cas1 : le dépôt se trouve autour des collecteurs faisant augmenter le rayon ; cas2 : le nombre de particules accroît dans le milieu tout en gardant les diamètres des collecteurs et particules fines constants ; cas3 : le nombre de particules fines et leurs diamètres augmentent pour des collecteurs constants ; cas4 : le nombre et le diamètre des particules fines augmentent ainsi que le diamètre des collecteurs.

1. Les particules immobiles se déposent autour des grains (collecteurs) de sables et vont ainsi modifier le diamètre des grains dans le milieu d_{gm} (cas 1) ;
2. Les particules immobiles d'un certain diamètre d_p constant dans les pores augmentent de nombre n_p au cours d'un essai de filtration (cas 2) ;
3. L'augmentation de la masse immobile durant un essai se traduit par l'augmentation du nombre de particules n_p ainsi que du diamètre des particules d_p , les particules forment des agrégats de quelques microns dans le milieu (cas 3) ;
4. Les particules immobiles se répartissent autour des collecteurs et dans les pores, en augmentant en nombre et en diamètre pour former des agrégats de plus en plus nombreux (cas 4).

À partir du modèle des sphères flottantes, [Bildstein \(1998\)](#) considère les espèces comme un ensemble de particules de formes sphériques flottant les uns à côté des autres, sans se toucher. La croissance de l'espèce est alors calculée en augmentant soit le nombre de particules n_p , soit leurs tailles d_p (*i.e.* leurs diamètres). Dans notre cas les particules immobiles argileuses ne sont pas sphériques mais plutôt hexagonales. Pour déterminer la durée de vie hydraulique des filtres de barrières perméables réactives, [Courcelles \(2007\)](#) réalise des essais de filtration sur un filtre en oxyde de magnésium. En appliquant le modèle des « sphères flottantes » pour des précipités de carbonates et d'hydroxydes, il trouve des résultats cohérents pour la prédiction du colmatage en fonction de la quantité de précipités formés.

L'adaptation de ce modèle à notre milieu, nous conduit à avoir quatre évolutions distinctes pour la détermination de la surface spécifique suivant le type de dépôt. Nous développerons cela dans les paragraphes suivants :

H1 : Augmentation du diamètre des grains d_g

Afin de calculer l'augmentation de d_g , il nous faut connaître l'épaisseur des particules déposées autour du grain collecteur. Nous avons supposé que les grains avaient une forme sphérique. Le volume initial du grain de sable s'écrit :

$$V_g^0 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_g}{2}\right)^3 \quad (3.42)$$

Si l'on considère que le dépôt d'une épaisseur e_d se fait tout autour du grain, d'une manière sphérique et homogène (Figure 3.20), le volume modifié du grain de sable après filtration et dépôt de particules fines s'écrit :

$$V_g^d = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_g}{2} + e_d\right)^3 \quad (3.43)$$

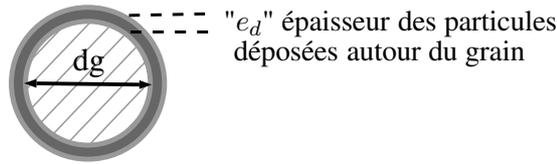


Figure 3.18 – Dépôt uniforme de particules fines autour d'un collecteur.

Le volume des particules déposées autour d'un grain, lequel tient compte notamment le volume mort β entre les particules, est estimé en faisant la différence entre les deux volumes des équations 3.42 et 3.43, ce qui nous donne :

$$V_{pim/g}^* = V_g^d - V_g^0 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_g}{2} + e_d \right)^3 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_g}{2} \right)^3 \quad (3.44)$$

A partir de l'équation 3.44 nous pouvons déduire l'épaisseur du dépôt e_d qui sera par la suite rajoutée au diamètre du grain de sable. Nous obtenons :

$$e_d = \left(\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot V_{pim/g}^* + \frac{d_g^3}{8} \right)^{1/3} - \frac{d_g}{2} \quad (3.45)$$

Le volume des particules déposées V_{pim}^* peut être relié à l'évolution de la porosité dans le milieu, où bien à la concentration immobile C_{im} . En faisant la différence entre la porosité initiale et la porosité après dépôt, nous obtenons :

$$V_{pim}^* = V_{total} \cdot (\phi_0 - \phi) \quad (3.46)$$

Le V_{pim}^* de l'équation 3.46 représente le volume des particules déposées dans toute la colonne, or ce qui nous intéresse c'est le dépôt autour d'un grain-collecteur pour cela, on écrit :

$$V_{pim/g}^* = \frac{V_T \cdot (\phi_0 - \phi)}{n_g} \quad (3.47)$$

Il nous faut maintenant connaître n_g le nombre de grains dans l'échantillon :

$$n_g = \frac{V_s}{V_g^0} = \frac{V_T \cdot (1 - \phi_0)}{V_g^0} \quad (3.48)$$

En combinant les équations 3.47 et 3.48 nous obtenons le volume de particules déposées autour d'un seul grain de sable :

$$V_{p_{im}^*/g} = \frac{V_g^0 \cdot (\phi_0 - \phi)}{(1 - \phi_0)} \quad (3.49)$$

L'équation 3.49 du volume $V_{p_{im}^*/g}$ est injectée dans l'équation 3.45 afin d'avoir l'épaisseur uniforme autour du grain de sable.

L'épaisseur du dépôt connue, nous pouvons alors calculer l'évolution du diamètre du grain modifié $d_{gm} = d_g + 2 \cdot e_d$. Le rayon modifié obtenu après le dépôt est $R_m = d_g/2 + e_d$. En adoptant l'hypothèse de l'augmentation du diamètre des grains de sable, nous obtenons l'évolution de la surface spécifique qui sera déterminée comme suit :

$$S = \frac{S_g^d}{V_g^d} = \frac{n_g \cdot 4\pi \cdot (d_{gm}/2)^2}{n_g \cdot \frac{4}{3}\pi \cdot (d_{gm}/2)^3} \quad S \text{ en } [1/\text{m}] \quad (3.50)$$

L'estimation de la perméabilité par le modèle Kozeny-Carman est réalisée en utilisant le diamètre des grains modifié, cela nous donne l'expression de la perméabilité suivante :

$$k = \frac{d_{gm}^2 \cdot \phi^3}{36 \cdot c \cdot (1 - \phi)^2} \quad k \text{ en } [\text{m}^2] \quad (3.51)$$

Étant donné que la densité n'est pas uniforme, la porosité n'est pas homogène dans tous les points de la colonne, le profil peut donc être considéré comme une superposition de couches d'une certaine épaisseur $L_j = 20\text{mm}$. En utilisant les enregistrements des profils de densité d'une colonne, nous pouvons calculer la porosité ϕ_j dans chaque couche j . Cela permet d'estimer la perméabilité définie par l'équation 3.51 pour chaque couche j .

$$k_j = \frac{d_{gm}^2 \cdot \phi_j^3}{36 \cdot c \cdot (1 - \phi_j)^2} \quad k_j \text{ en } [\text{m}^2] \quad (3.52)$$

La perméabilité équivalente est estimée en utilisant la formule d'un massif multicouche d'un nombre N_c , pour un écoulement perpendiculaire au plan des couches. L'expression de la perméabilité équivalente est :

$$K_{eq} = \frac{\sum_{j=1}^{N_c} L_j}{\sum_{j=1}^{N_c} \left(\frac{L_j}{k_j} \right)} \quad K_{eq} \text{ en } [\text{m}^2] \quad (3.53)$$

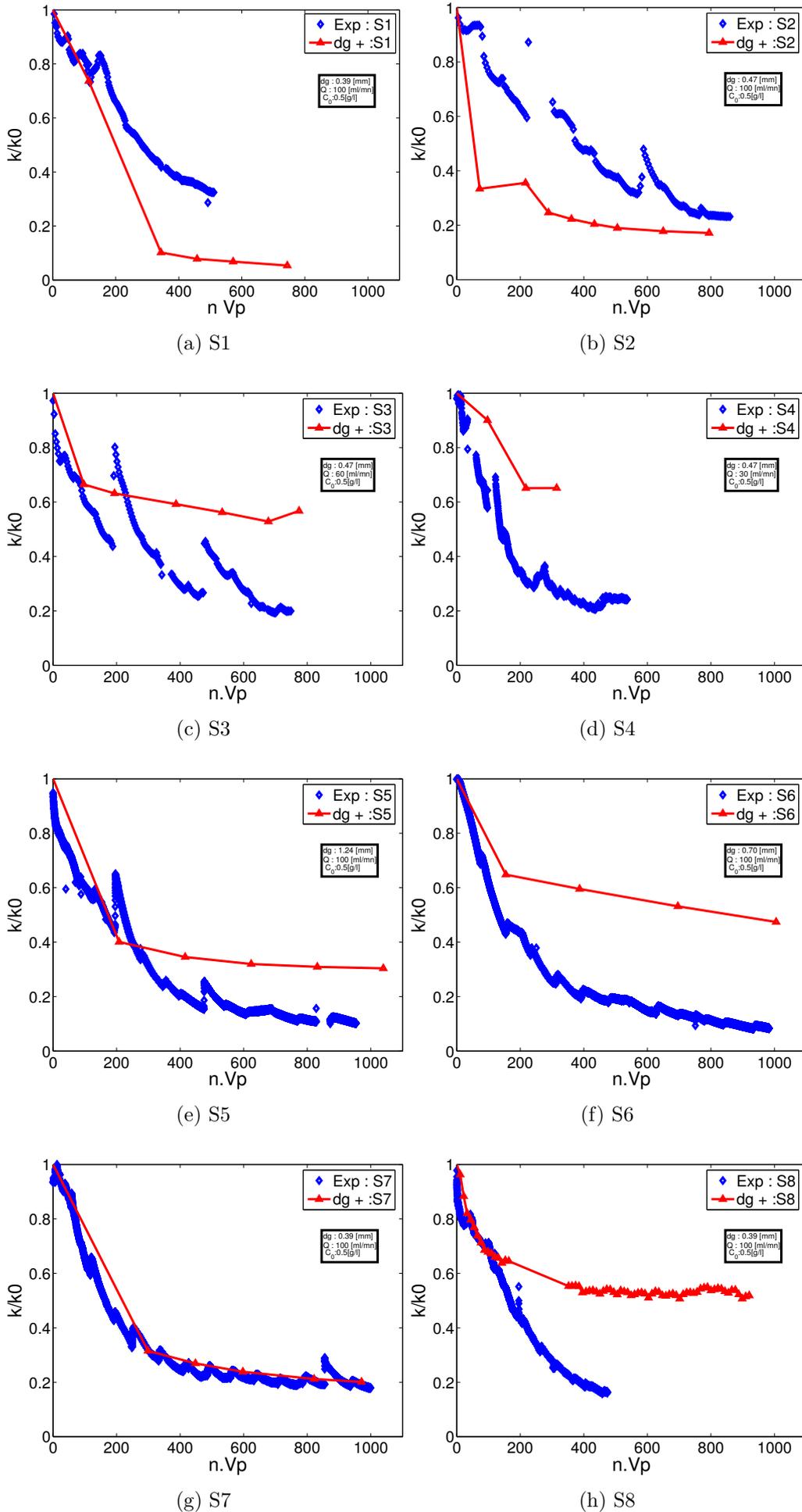


Figure 3.19 – H1 : Courbes expérimentales et modélisées de l'évolution de k (d_g augmente).

Les résultats de l'évolution de la perméabilité calculés par le modèle de Kozeny-Carman pour les différents essais (courbes rouges) sont comparés avec les résultats expérimentaux (courbes bleues), calculés par la perméabilité de Darcy (Figure 3.19). Nous pouvons constater que pour les essais (S3, S4, S5, S6, S8), nous avons une sous estimation de la chute de perméabilité obtenue avec le modèle de Kozeny-Carman en utilisant l'hypothèse d'un dépôt uniforme autour des grains. Ceci va nous donner un colmatage du filtre qui n'est pas en concordance avec le colmatage globale macroscopique qui peut se produire dans la réalité. L'essai S7, donne une bonne approximation de la perméabilité par le modèle de Kozeny-Carman, en supposant que la surface spécifique soit calculée par un dépôt uniforme autour des grains. Les estimations du modèle pour les essais S1 et S2 surestiment largement la chute de perméabilité.

Nous allons passer au cas numéro 2 pour calculer la surface spécifique (Figure 3.17), en faisant augmenter le nombre de particules.

H2 : Augmentation du nombre de particules déposées n_p avec un d_g constant

Dans le cas où le diamètre du grain de sable reste constant, nous pouvons calculer la surface spécifique en additionnant les deux familles de particules (sable + particules fines de kaolinite). Ceci nous permet d'écrire l'équation 3.34 de la surface spécifique comme suit :

$$S = \frac{n_g \cdot S_g + n_p \cdot S_p}{n_g \cdot V_g + n_p \cdot V_p} \quad S \text{ en } [1/\text{m}] \quad (3.54)$$

où, S_g et S_p sont respectivement la surface spécifique du grain de sable et la surface spécifique de la particule de kaolinite en suspension. V_g et V_p sont respectivement le volume du grain de sable et le volume de la particule fine. Le nombre n_g est estimé à partir de l'équation 3.48.

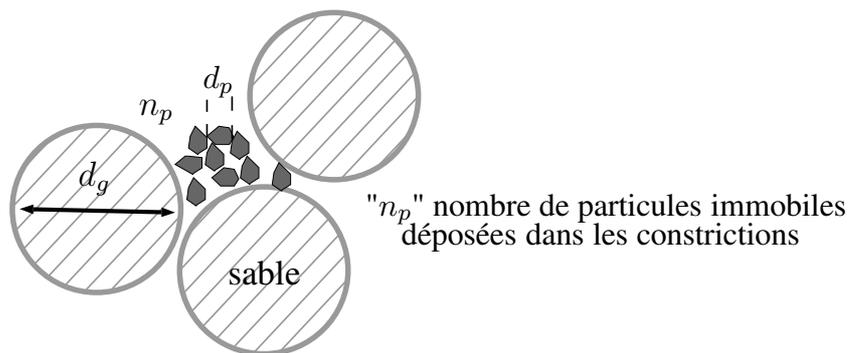


Figure 3.20 – Dépôt avec augmentation du nombre de particules n_p .

Connaissant le volume des particules bloquées durant l'injection V_{pim} et le volume d'une particule V_p , nous pouvons estimer la valeur de n_p . Celles-ci seront dans des sites de crevasse

ou dans des sites de caverne (Figure 3.20). Les particules fines de kaolinite ont une forme hexagonale, donc V_p est calculé en conséquence.

$$V_p = Nf \cdot \frac{3}{2} \cdot 3^{1/2} \cdot d_p^2 \cdot e_f \quad (3.55)$$

où Nf est le nombre de feuillets superposés présents dans une particule, e_f est l'épaisseur d'un feuillet d'argile, dans la famille T :O, la kaolinite à une épaisseur d'environ 7 Å.

Le nombre de particules n_p est calculé à partir de la masse des particules déposées et de la masse d'une particule m_p . Par ailleurs, la masse d'une particule de kaolinite est égale à $m_p = V_p \cdot \rho_p$. Ce qui nous donne le n_p par unité de volume de la colonne :

$$n_p = C_{im} \cdot \phi_0 \cdot \frac{1}{m_p} \quad (3.56)$$

Nous faisons augmenter le nombre de particules fines et nous maintenons le nombre de feuillets Nf égale à 1. D'autres part, nous savons que les valeurs de surface spécifique sont très importantes pour les particules argileuses, une chute brutale de la perméabilité est observée. La figure 3.21, montre les résultats de la perméabilité relative expérimentale des différents essais et les résultats du modèle de Kozeny-Carman, avec l'hypothèse d'une augmentation du nombre de particules dans le milieu. Nous remarquons que le modèle nous donne des chutes de perméabilités assez importantes.

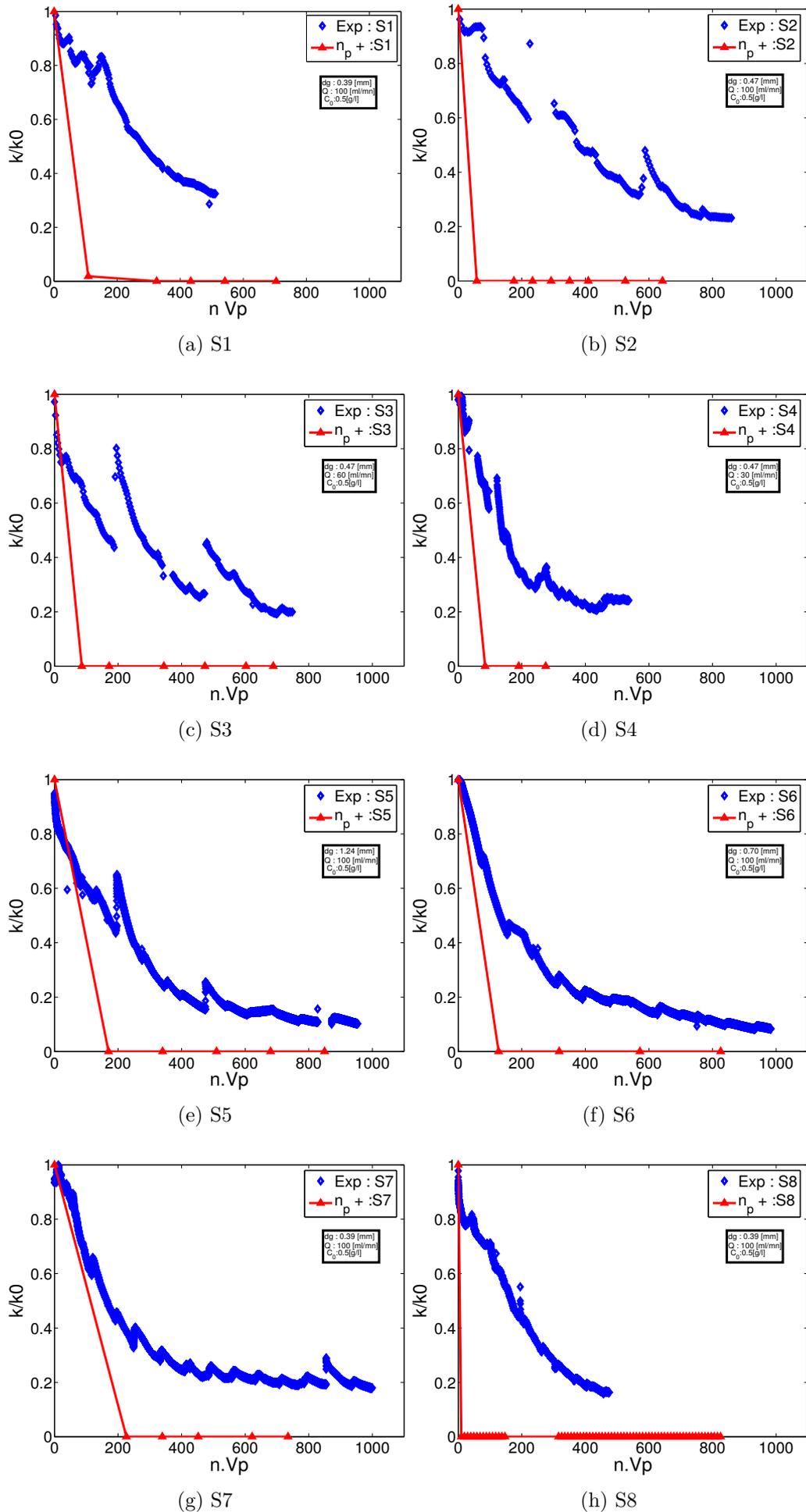


Figure 3.21 – Hypothèse 2 : évolution de perméabilité (n_p augmente, d_p constant, d_g constant).

H3 : Augmentation du nombre de particules déposées n_p , du diamètre d_p , pour un d_g constant

La particule de kaolinite dans l'eau va former des agrégats, par conséquent nous ne pouvons pas estimer le volume d'une seule particule mais plutôt un empilement de particules ($Nf > 1$ pour chaque particule), cela nous donne une épaisseur $H = e_f \cdot Nf$ de l'ordre de quelques μm . Par ailleurs, nous avons une augmentation du nombre de particules n_p qui se trouvent dans le milieu et une augmentation des dimensions de la particules d_p (Figure 3.17 : cas3). La figure 3.22 donne les courbes d'évolution de la perméabilité mesurée et de la perméabilité prédite, on remarque qu'avec cette hypothèse, on se trouve toujours en surestimation de la perméabilité prédite en comparaison à l'hypothèse H2 précédente. La surface spécifique augmente considérablement, elle est prépondérante dans l'estimation de la chute de la perméabilité.

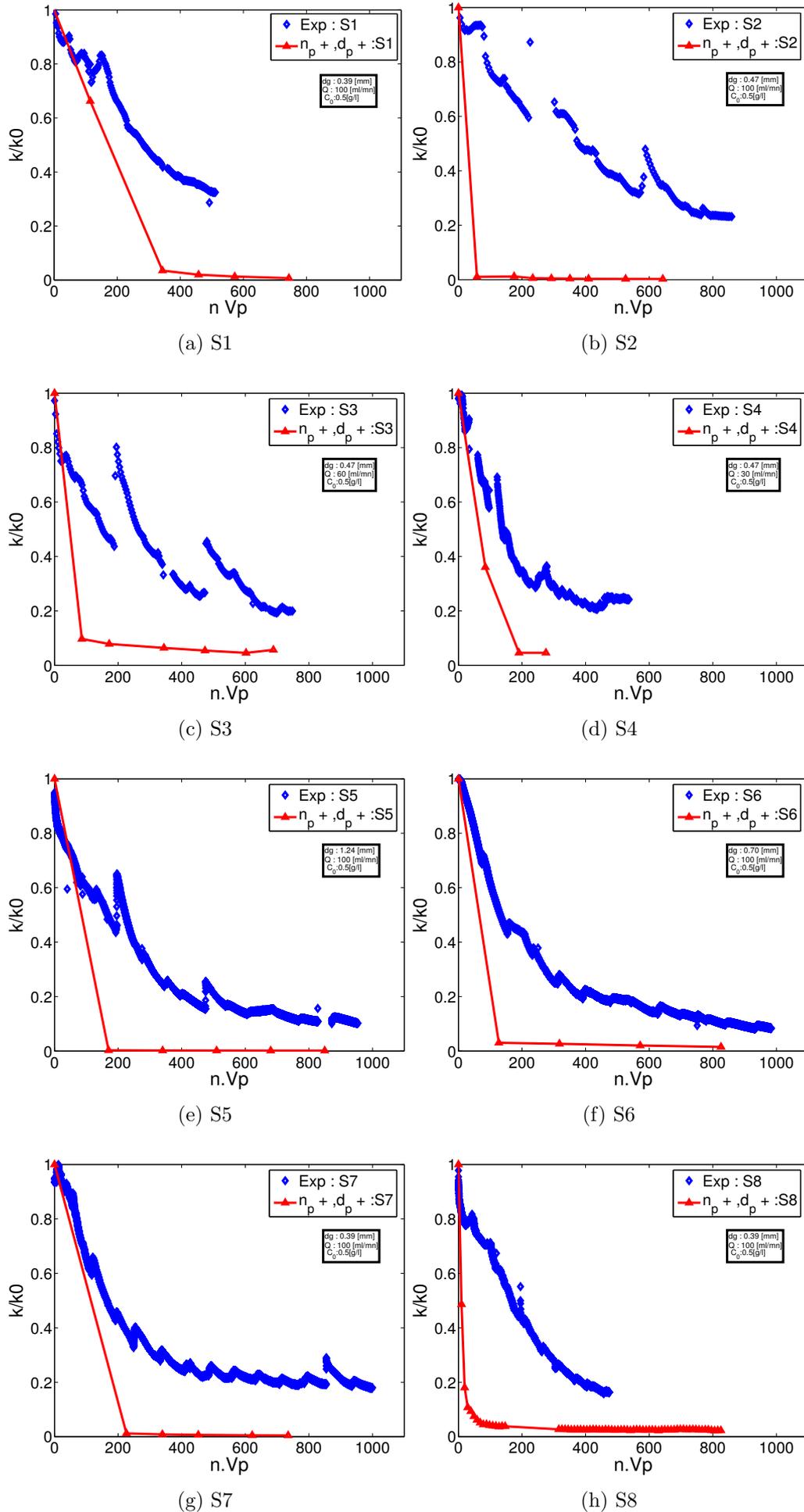


Figure 3.22 – Hypothèse 3 : évolution de perméabilité (n_p augmente, d_p augmente, d_g constant).

À la fin des essais d'injection, nous avons effectué des prélèvements d'échantillons (sable+ argile) à différents niveaux de la colonne. Nous les avons fait passer au microscope (Figure 3.23) et les observations nous ont conduit à penser que le dépôt de particules se faisait en deux séquences. En début d'essai, les particules fines se déposent par attachement dans les sites de surfaces autour du collecteur (Figure 3.24 cas1). Une fois les sites de surfaces saturés, les particules sont entraînées vers des sites de crevasse et de caverne, formant ainsi des ponts entre les collecteurs (Figure 3.24 cas2). Cette dernière constatation nous conduit à combiner les approches précédentes pour le calcul de la surface spécifique.

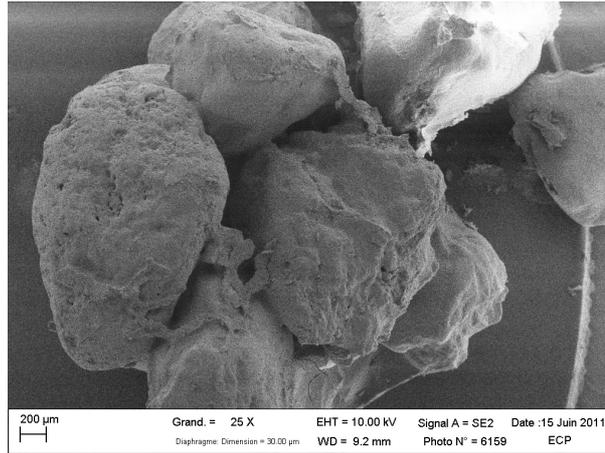


Figure 3.23 – Observation microscopique d'un prélèvement (essai : S5) après un essai de filtration.

H4 : Augmentation du nombre de particules déposées et du diamètre du collecteur

En faisant l'hypothèse qu'une partie des particules immobiles se dépose autour des grains et l'autre partie peut former des ponts entre les grains, nous allons calculer la surface spécifique en introduisant des coefficients de variation des sites de dépôt ; le $P1$ pour les particules qui se déposent autour du grain (sites de surface). Au début de l'essai $P1 = 1$ et puis il diminue dans le temps. Cela laisse la place au coefficient $P2$ qui représente le dépôt dans des sites de crevasse et de caverne. Le $P2$ prend en considération l'augmentation du nombre de particules dans le milieu, tel que $P2 = 1 - P1$. Pour l'expression de la surface spécifique nous devons introduire respectivement $P1$ et $P2$ dans le calcul de l'épaisseur du dépôt e_d et le nombre de particules n_p . En introduisant le $P1$ dans l'équation 3.45, le nouveau dépôt est :

$$e_{P1} = \left(\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot P1 \cdot V_{p_{im/g}} + \frac{d_g^3}{8} \right)^{1/3} - \frac{d_g}{2} \quad (3.57)$$

La surface et le volume des grains de sable seront calculés avec la nouvelle expression de l'épaisseur e_{P1} . Maintenant, en introduisant le $P2$ dans l'augmentation du nombre de particules

déposées (équation 3.56), nous obtenons :

$$n_{p,P2} = P2 \cdot C_{im} \cdot \phi_0 \cdot \frac{1}{m_p} \quad (3.58)$$

En injectant les équations 3.57, 3.58 dans l'équation 3.54 de la surface spécifique, nous obtenons :

$$S = \frac{n_g \cdot S_{g,P1} + n_{p,P2} \cdot S_p}{n_g \cdot V_{g,P1} + n_{p,P2} \cdot V_p} \quad S \text{ en [1/m]} \quad (3.59)$$

Les figures suivantes nous donnent l'évolution de $K/K0$ mesurée et $K/K0$ modélisé. Si nous supposons que le pourcentage $P1$ varie linéairement avec le temps, l'évolution peut être identifiée par la valeur de $P1$ pour un temps de référence que nous avons choisi comme dix jours $P10$. En ajoutant ce paramètre pour chaque essai on peut optimiser la modélisation de la perméabilité mesurée (Figure 3.25).

L'évolution de la perméabilité (Figure 3.26) est estimée en prenant un $P10$ constant de 0,92.

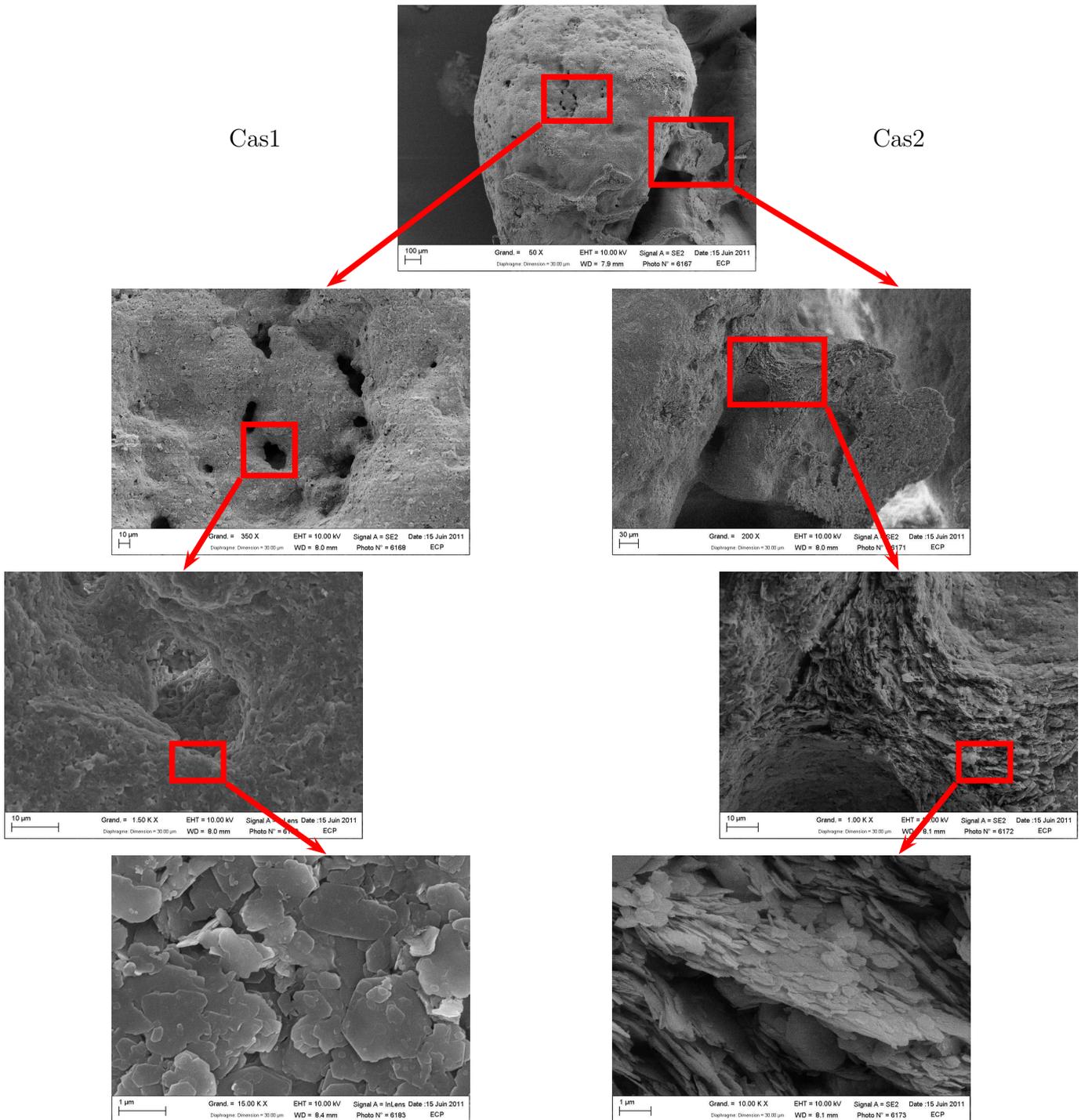


Figure 3.24 – Observations microscopiques : Cas1 : dépôt autour de la surface du grain, cas 2 : dépôt entre les grains de sables formant des ponts, S5.

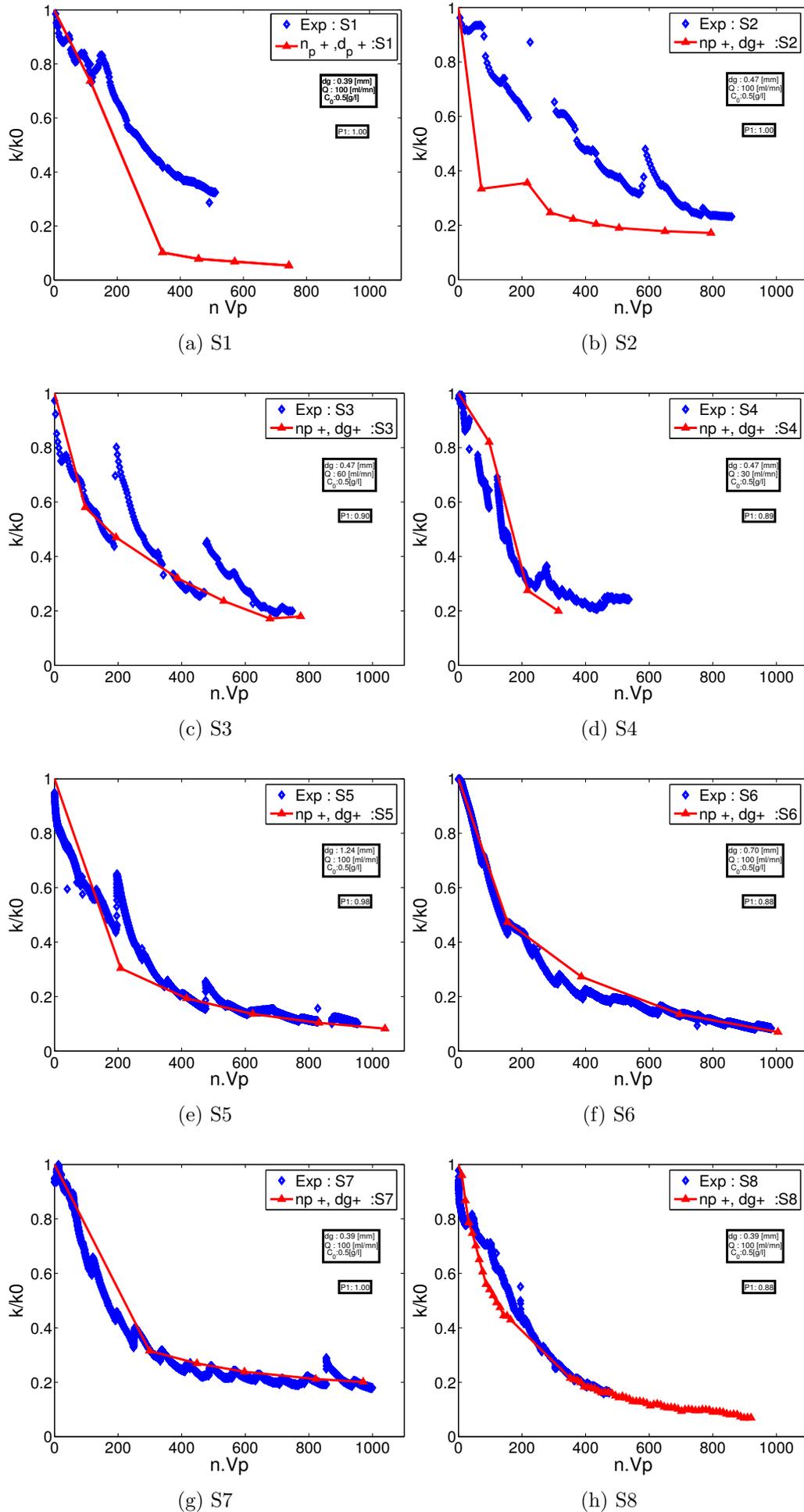


Figure 3.25 – Hypothèse 4 : évolution de perméabilité (n_p augmente, d_p augmente, d_g augmente).

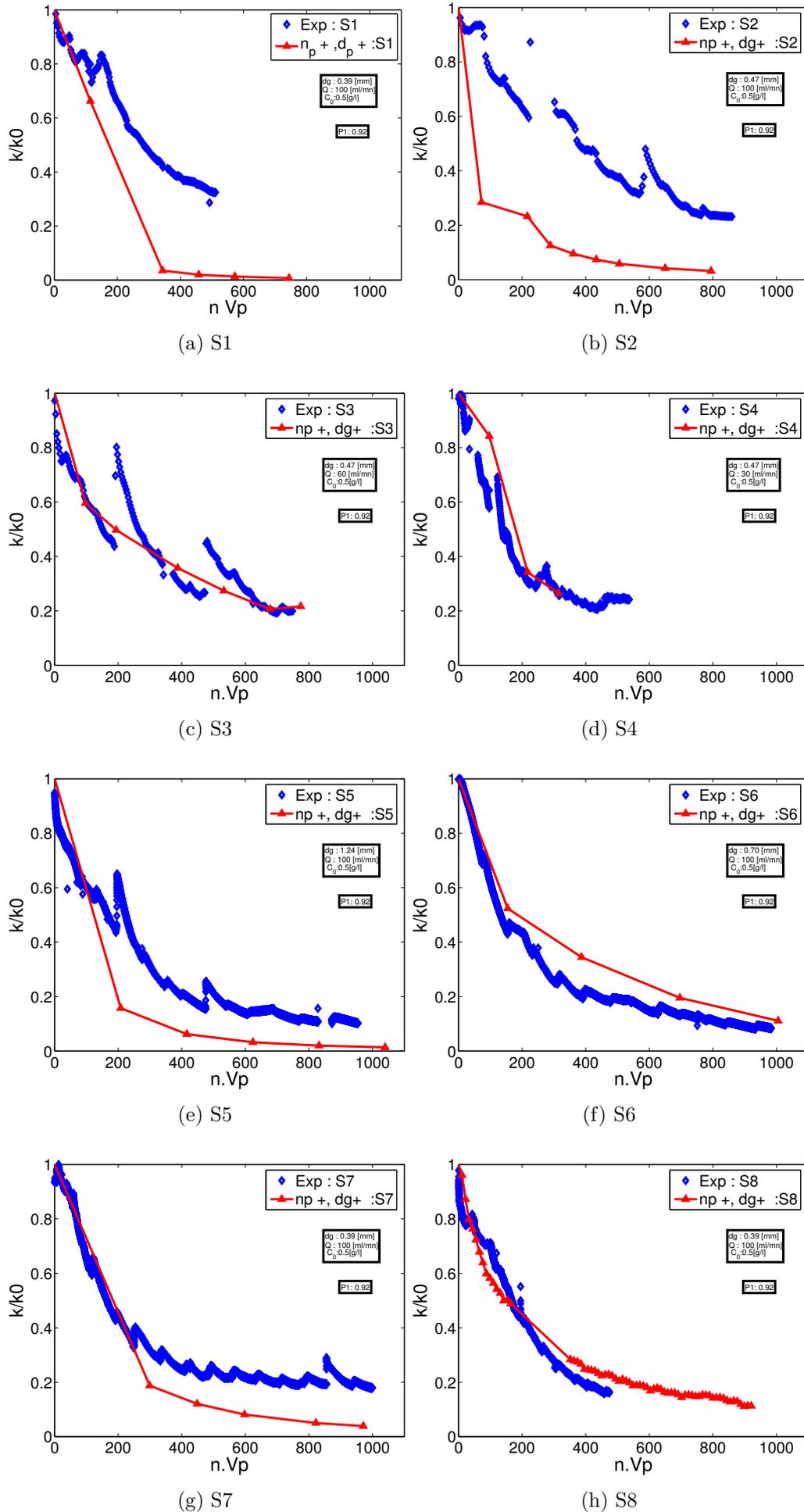


Figure 3.26 – Cas4-1 : évolution de K (n_p augmente, d_p augmente, d_g augmente, $P10=0,92$).

Jusqu'à présent, nous avons considéré un coefficient c de Kozeny-Carman constant durant un essai de filtration. Cependant, ce dernier dépend de la tortuosité (équation 3.7), laquelle est variable dans le temps en fonction de la porosité. Cette dernière diminue durant un essai de filtration de particules, elle va faire augmenter le trajet parcouru par les particules, la tortuosité est ainsi augmentée. Dans ce qui suit, nous prenons en compte cette variation de tortuosité dans le calcul de la perméabilité par le modèle de Kozeny-Carman et cela dans le cas d'un dépôt de fines particules autour du grain de sable, dans un premier temps $P1$ et ensuite pour le dépôt qui va former des ponts entre les grains collecteurs. Ceci est bien observé dans la figure 3.23. La figure 3.27 montre les évolutions de K modélisés en rouge et les évolutions de K mesurés en bleue.

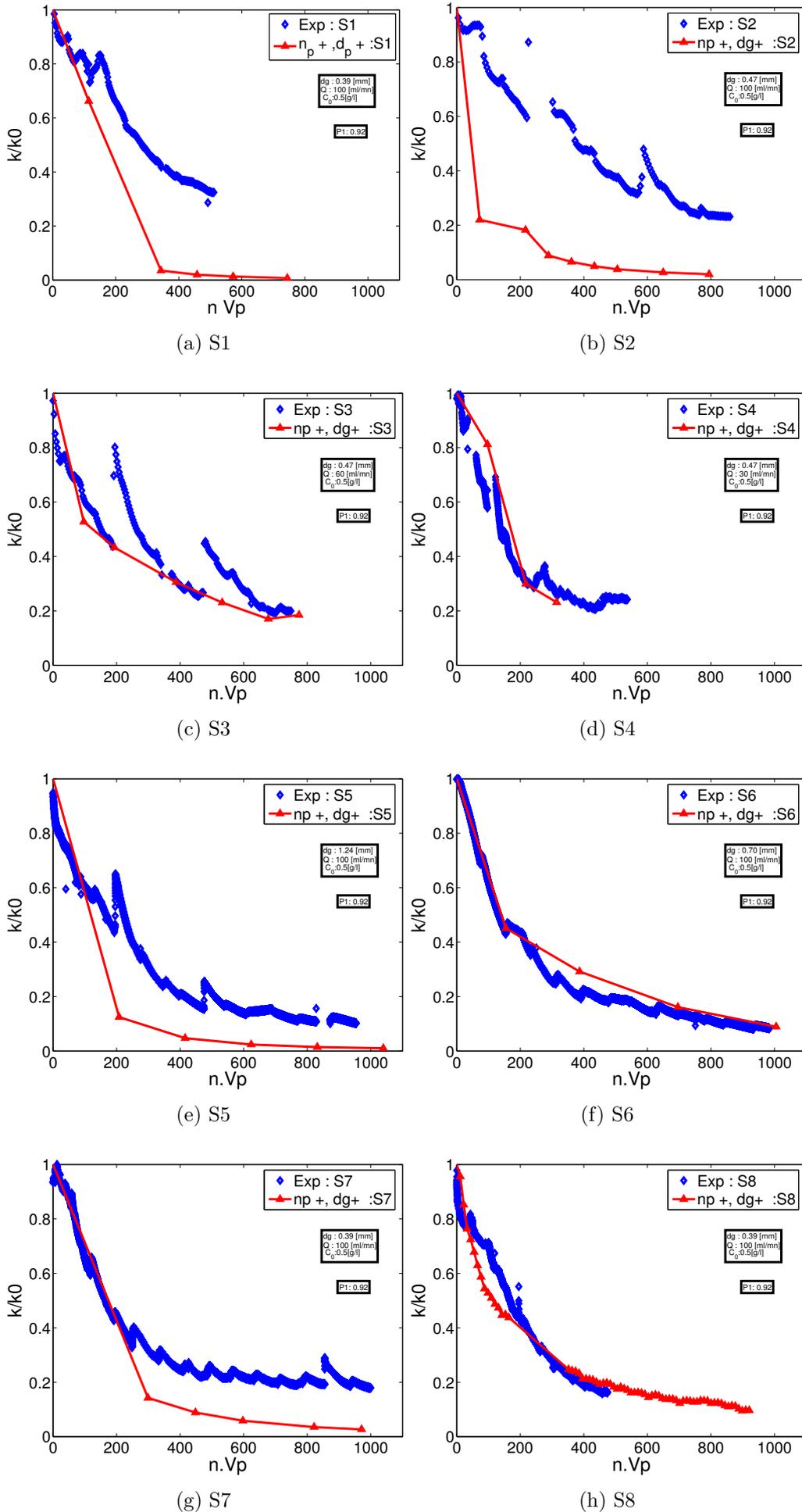


Figure 3.27 – Cas4-2 : évolution de K (n_p augmente, d_p augmente, d_g augmente, tortuosité évolue).

3.5 Conclusion

Le processus de filtration de particules fines dans un milieu poreux sableux hétérogène est assez complexe, il dépend à la fois de la nature du milieu poreux (*e.g.* taille des particules, distribution des pores), mais aussi des conditions d'injection durant l'essai (*e.g.* vitesse d'écoulement, concentration et taille des particules fines entre autres). Cela se traduit par le dépôt d'une partie de ces particules qui est bloquée dans les pores et qui se dépose autour des collecteurs de sables, et une autre partie qui est transportée puis déposée plus loin le long de la colonne de test. Le dépôt de particules va se faire autour des collecteurs sur des sites de surface au début de l'essai, ensuite le dépôt se fera entre les grains dans des sites de cavernes et des sites de crevasses formant des liaisons de pontage. Une restructuration géométrique des pores est constatée et qui entraînerait une diminution des volumes de pores, donc la diminution de la porosité. La perméabilité du système de filtration est affectée par la diminution de la porosité et l'accumulation des particules dans les pores.

Nous pouvons constater que la formation de cake qui engendre des ponts de liaison varie suivant la vitesse d'injection, mais aussi la forme et la taille des grains. Plus la taille des grains est importante, plus longtemps va durer le dépôt autour du grain, donc la première phase de dépôt est plus importante (test S5). Cela dit, pour un milieu dont la porosité initiale est faible, nous allons rapidement arriver à la deuxième phase de dépôt (test S2 et S3). Donc nous ne pouvons pas prendre un $P1$ à 10 jours constant pour tous les types de sables. Ce paramètre peut éventuellement varier inversement par rapport au diamètre représentatif des sables.

L'utilisation du modèle de Kozeny-Carman pour la prédiction de la perméabilité est capable de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu pour chaque couche (ϕ_j, k_j) , ainsi que l'évolution de la tortuosité du milieu. La comparaison entre le modèle utilisé et les résultats expérimentaux le long des essais donne de bonnes approximations de l'évolution de la perméabilité et donc du colmatage des filtres. Cette approximation a été faite uniquement en prenant en compte l'évolution de la porosité par le biais du gammadensimètre, l'évolution de la surface spécifique basée sur les essais au porosimètre à mercure et les observations microscopiques et enfin une évolution de la tortuosité du milieu est nécessaire pour prendre en compte les changements du parcours des particules.

Dans le prochain chapitre, une modélisation du phénomène de transport et de dépôt de particules fines dans un milieu poreux est présentée, cela afin de prendre en compte les différents paramètres et mécanismes qui peuvent intervenir pendant ce processus. Un modèle de filtration est proposé, regroupant les différentes remarques sur l'évolution de la perméabilité et la chronologie du dépôt dans un milieu hétérogène.

Chapitre 4

Modélisation de la filtration

Sommaire

4.1	Introduction	114
4.2	Les modèles numériques	116
4.2.1	Les modèles réseaux	116
4.2.2	Les modèles stochastiques	117
4.2.3	Les modèles d'analyse de trajectoire	118
4.2.4	Les modèles phénoménologiques	120
4.2.5	Choix du type de modèle de filtration	121
4.3	Approche macroscopique du problème de la filtration	121
4.3.1	Conservation de la masse du fluide	122
4.3.2	Conservation de la masse des particules en suspension	123
4.3.3	Taux de dépôt	127
4.4	Théorie de la filtration	127
4.4.1	Cinétique de la filtration du premier ordre	128
4.4.2	Cinétique de la filtration du second ordre	130
4.4.3	Prédiction du coefficient de filtration-dépôt	133
4.4.4	Synthèse sur le modèle de filtration	134
4.5	Modèle macroscopique développé	135
4.5.1	Mise en équation du problème	137
4.5.2	Étude des paramètres du modèle : λ_0 , $C_{im,max}$	138
4.5.3	Bilan du modèle développé	163
4.5.4	Analyse de sensibilité des résultats	163
4.6	Conclusion	166

4.1 Introduction

Les recherches dans le domaine hydrogéologique, mais aussi dans d'autres domaines industriels et médicales ont pour but soit la filtration des particules fines par la rétention de ces particules dans un milieu poreux, soit d'éviter le dépôt des particules durant l'injection des particules afin de contourner le colmatage du milieu. Notre objectif est de retenir les particules, tout en estimant la durée de vie du filtre par le biais de l'évolution de la perméabilité. Par exemple, les problèmes liés à la pollution des eaux nécessitent une bonne optimisation physique des filtres de barrières anti-pollution et une modélisation des phénomènes de transport-rétention des polluants dans le milieu naturel. La forte abondance des particules fines en suspension joue un rôle déterminant dans la contamination des eaux souterraines de par leur capacité d'adsorption des contaminants (*i.e* métaux lourds, matière organique, sels) mais aussi par leur capacité de les transporter et de les déposer dans le milieu (McDowell-Boyer *et al.*, 1986), ce qui obstrue les pores et conduit au colmatage des milieux.

Le transport de particules fines ou colloïdales dans des liquides à travers des lits poreux a fait l'objet de nombreuses recherches et dans différents domaines industriels. Il peut être accompagné d'un dépôt des particules dans des pores à travers les différentes profondeurs. Ce processus est appelé filtration en profondeur ou filtration sur lit en profondeur. Différentes études ont été réalisées sur les étapes de la filtration (premier ordre et second ordre) en fonction du dépôt (Saiers et Hornberger, 1994). Il existe différents modèles, les plus répandus sont : le modèle par convection diffusion macroscopique (modèle phénoménologique) et le modèle par analyse de trajectoire qui fait apparaître les mécanismes d'interception et les forces appliquées. La difficulté pour prédire l'efficacité de filtration d'un milieu par le modèle phénoménologique dans les bonnes conditions, se situe au niveau du coefficient de filtration pour un filtre encore propre.

La migration des particules dans le milieu est régie par la convection, la dispersion-diffusion et les échanges avec le milieu (le dépôt et le relargage dans le milieu). Le phénomène de dépôt est étudié ainsi que les paramètres qui influencent le détachement ou bien le relargage des particules fines (Ryan et Elimelech, 1996). Le dépôt de la particule est essentiellement dû à des changements dans : (i) les conditions hydrauliques (vitesse), (ii) les conditions physico-chimiques (force ionique, pH) par « attachment » en surface de collecteurs, ou bien (iii) des captures dues à la sédimentation des particules (de densité plus importante que l'eau) et des captures physiques par des blocages dans les pores trop petits « straining ».

Ce dernier chapitre de notre étude est orienté vers la modélisation des différents mécanismes et observations mises en évidence dans la partie expérimentale du chapitre précédent. L'objectif est la description du phénomène de transport et de dépôt dans le milieu, par le biais de modèle

phénoménologique et les équations de conservation de masse (voir le diagramme dans la figure 4.1), en application aux données expérimentales des essais de filtration sur les colonnes en laboratoire. Le dépôt de particules exposé dans la partie précédente sera essentielle dans la détermination du coefficient de dépôt par le modèle d'analyse de trajectoire.

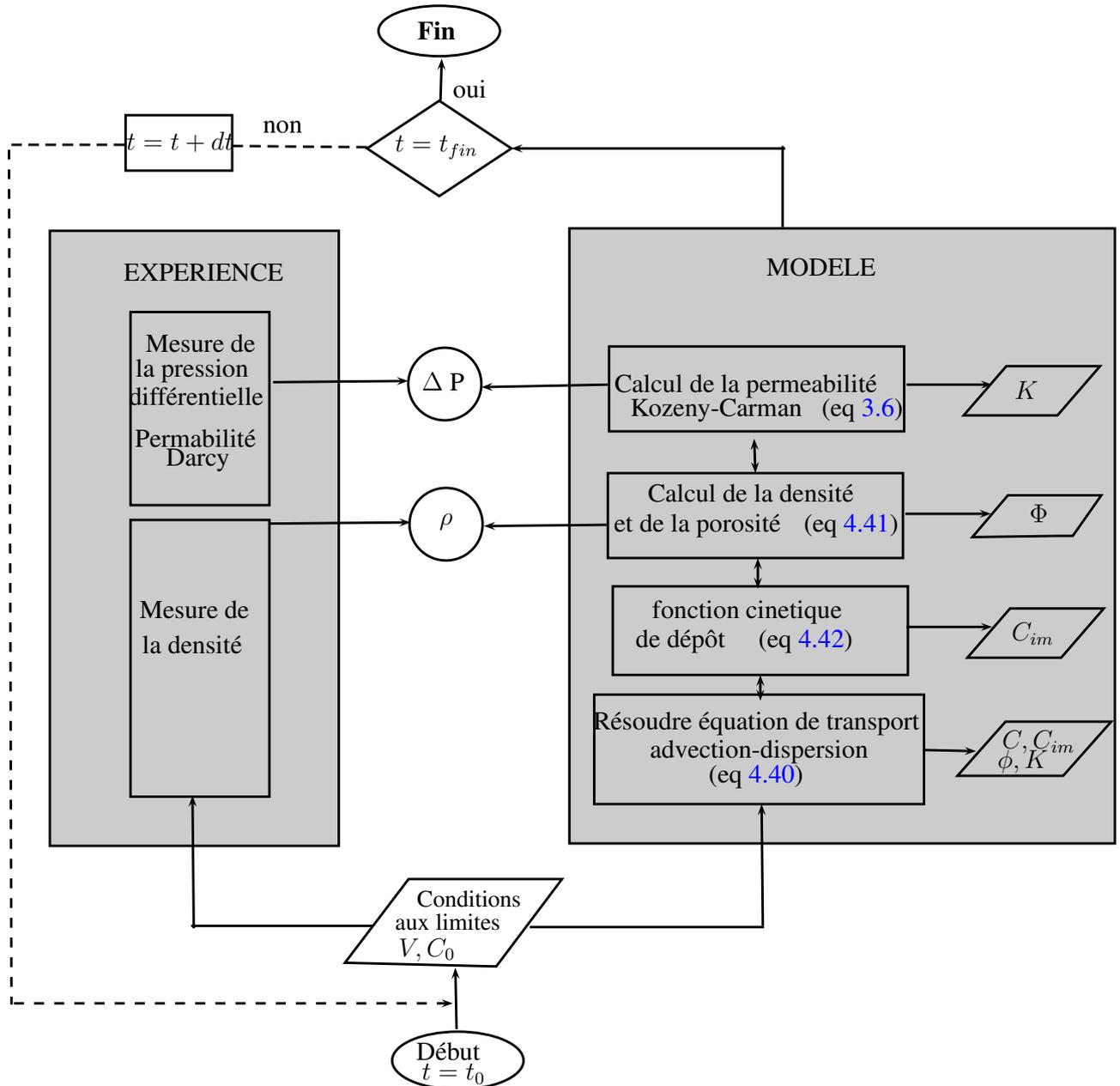


Figure 4.1 – Dialogue expérience-calcul

4.2 Les modèles numériques

Il existe de nombreuses approches pour la modélisation du transport et du transfert dans les milieux poreux, dont : une approche phénoménologique (macroscopique) et une approche théorique (microscopique). Dans le premier cas le matériau du filtre est traité comme une « boîte noire » et le phénomène de filtration est déterminé à partir de paramètres empiriques ; la perméabilité de l'écoulement est décrite par la loi de Darcy et le coefficient de filtration λ est décrit à partir de la concentration introduite pendant la filtration ainsi que d'autres quantités physiques. Dans une seconde approche, le filtre est modélisé par des collecteurs avec des géométries simplifiées (*e.g.* sphères, cylindre, capillaire), le milieu est associé à un seul collecteur (singulier) et souvent le transport-dépôt est trouvé d'une manière analytique.

On trouve dans la littérature plusieurs modèles numériques afin de décrire la structure du milieu filtrant d'une part et les phénomènes qui interviennent d'une autre part, notamment les différents modes de capture des particules dans le filtre. Dans le cas d'une filtration en profondeur, Ghidaglia (1994) évoque soit un modèle déterministe pour traiter les équations ou alors une approche probabiliste et dans ces cas on décrit la filtration comme un processus stochastique. Les modèles numériques pour la filtration dans des couches en profondeur sont classés dans la littérature en quatre grandes catégories (Ghidaglia, 1994; Rege et Fogler, 1988; Reddi *et al.*, 2000) :

- Phénoménologique ;
- Analyse de trajectoire ;
- Réseaux ;
- Stochastique.

Une description détaillée de chaque modèle est en dehors des objectifs de ce travail. Nous discutons brièvement de quelques modèles avec le but de rappeler leurs applications et leurs limites. Nous fournirons par la suite le modèle utilisé pour simuler nos résultats expérimentaux.

4.2.1 Les modèles réseaux

Le modèle de réseaux est considérablement utilisé dans la littérature (Ghidaglia, 1994; Rege et Fogler, 1988; Kim et Whittle, 2006). Dans ce modèle introduit par Fatt (1956), l'espace poral est modélisé par un réseau de liens interconnectés qui forment le milieu poreux. Nous trouvons dans la littérature plusieurs formes de réseaux de taille de pores pouvant être aléatoire (Figure 4.2). Le débit de fluide dans chaque lien est calculé en résolvant les équations de continuité en chaque nœud du réseau.

Dans le modèle de Ghidaglia (1994), les pores sont modélisés par des tubes cylindres. Le réseau est carré, à deux dimensions et incliné à 45 degrés par rapport à la direction de l'écoule-

ment. Le débit d'écoulement dans chaque pore est calculé par la loi de Poiseuille. La particule se propage dans les pores par un mode de propagation probabiliste. Cela est défini par la probabilité qu'une particule se trouvant à un nœud, puisse pénétrer dans un pore (proportionnellement au débit dans ce pore). Cela se traduit par l'entraînement des particules par l'écoulement vers les pores à plus forts débits. Cette hypothèse a aussi été utilisée par [Rege et Fogler \(1988\)](#). Ajouté a cela, la loi de probabilité tient compte des différents mécanismes de blocage (constriction ou interception directe). [Kim et Whittle \(2006\)](#) présentent le modèle réseau pour des pores cylindriques, la résolution des équations d'écoulement à l'échelle du pore est basée sur la loi de Navier-Stokes. Ce modèle est élaboré pour l'infiltration de particules mono-disperse et non browniennes sous l'action des forces hydrodynamiques et gravitationnelles.

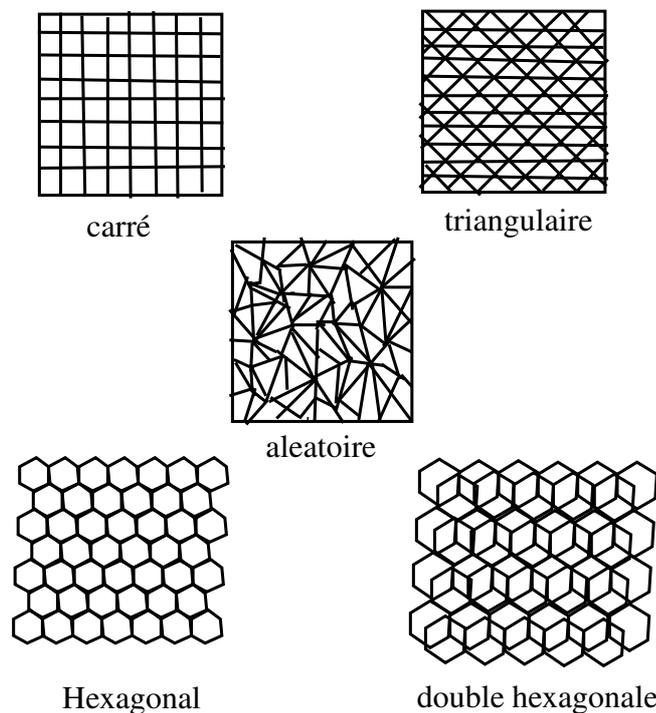


Figure 4.2 – Les différentes géométries des modèles réseaux ([Rege et Fogler, 1988](#)).

4.2.2 Les modèles stochastiques

Ces modèles sont basés sur des descriptions probabilistes des phénomènes rencontrés dans un essai de filtration en profondeur. Cette approche stochastique va associer aux phénomènes des lois de probabilité, sans pour autant donner des descriptifs sur : la taille des pores, les distributions de taille des particules, ou les morphologies des dépôts (mécanismes de rétention occasionnés dans les pores). Le modèle simule la performance de la filtration en profondeur en considérant un processus de naissance ou de mort ([Rege et Fogler, 1988](#)). Un événement de

naissance représente un pore initialement ouvert se trouvant être bloqué et un événement de mort représente un pore débloquent initialement bloqué et cela en raison de relargage des particules. Le nombre moyen de pores bloqués à un moment donné est déterminé par la résolution des équations de probabilités et se trouve ensuite lié à la vitesse du fluide et à la perméabilité. Ce modèle est considéré comme intermédiaire entre les modèles d'analyse de trajectoire et phénoménologique que nous allons voir.

4.2.3 Les modèles d'analyse de trajectoire

Le principe du modèle est l'analyse de la trajectoire de la particule de filtration en faisant intervenir deux éléments de base : 1. Le concept de l'élément unité du lit (UBE) (élément collecteur) ; 2. L'analyse de la trajectoire.

Le concept représentatif des milieux granulaires par des (UBE) a été introduit par [Payatakes *et al.* \(1973\)](#) et puis par [Tien et Payatakes \(1979\)](#) (cité dans [Zamani et Maini, 2009](#)). Ils supposent qu'un lit filtrant homogène peut être composé d'un certain nombre d'éléments de lit connecté en série de longueur l , dont chacun à son tour est composé d'un certain nombre de collecteurs. Ces collecteurs ont des tailles et des géométries spécifiques de telle sorte à pouvoir calculer l'écoulement (Figure 4.3). Par ailleurs l'efficacité η de chaque collecteur peut être déterminée à partir des mécanismes de transport des particules en suspension (sédimentation, forces de van der Waals, interception directe).

les collecteurs ont été regroupés en trois catégories : sphérique, capillaire, et collecteur en forme de tube de constriction.

Modèle de collecteur capillaire

Le modèle est assez simple dans lequel le milieu est représenté par des collecteurs en forme de cylindre de même taille.

Modèle de collecteur tube en constriction

Le modèle de collecteur en tube de géométrie de constriction décrit un écoulement de fluide dont la direction peut converger ou bien diverger. [Zhao \(1994\)](#) décrit trois types de géométries appliquées : géométrie parabolique, géométrie sinusoïdale et une géométrie hyperboloïde.

Modèle de collecteur sphérique

Dans ce modèle la sphère collectrice représente le grain du milieu. L'écoulement autour d'un collecteur sphérique peut être obtenu à partir d'équations appropriées. Nous trouvons deux

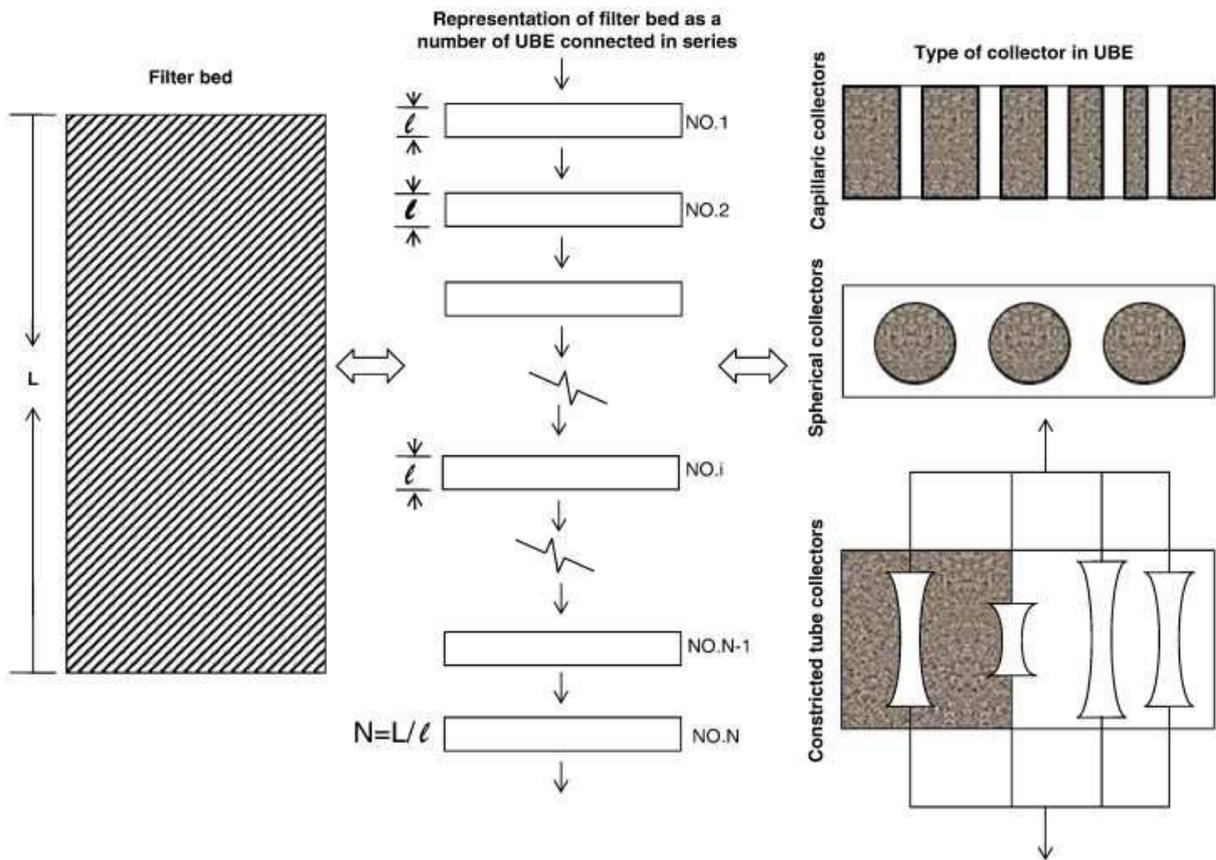


Figure 4.3 – Schéma représentatif du milieu granulaire d'après [Tien et Payatakes \(1979\)](#) (cité dans l'article [Zamani et Maini, 2009](#)).

modèles sphériques dans la littérature : le modèle de sphère isolée et le modèle de Happel ([Happel, 1958](#)).

- Le modèle de sphère isolée impose aux collecteurs d'être totalement indépendants les uns des autres. Par conséquent, le champ d'écoulement autour de chaque sphère est supposé être le même que celui de l'écoulement du fluide.
- Le modèle de Happel sphere-in-cell est le plus utilisé pour les milieux granulaires, la géométrie a été simplifiée à un grain sphérique représentant le collecteur, lequel est entouré par une couche de fluide dont l'épaisseur est calculée de telle sorte que la porosité du milieu à l'échelle macroscopique soit correctement respectée (Figure 4.4a).

Un autre modèle identique à celui de Happel dans la conception et la formulation est le modèle de Kuwabara ([Kuwabara, 1959](#)), (il est cité dans [Zhao, 1994](#)). La différence entre ces deux modèles intervient dans les conditions aux limites sur la couche de fluide qui entoure le collecteur. Dans le modèle de Kuwabara, il est supposé que la vorticité sur la surface du fluide en enveloppe est nulle.

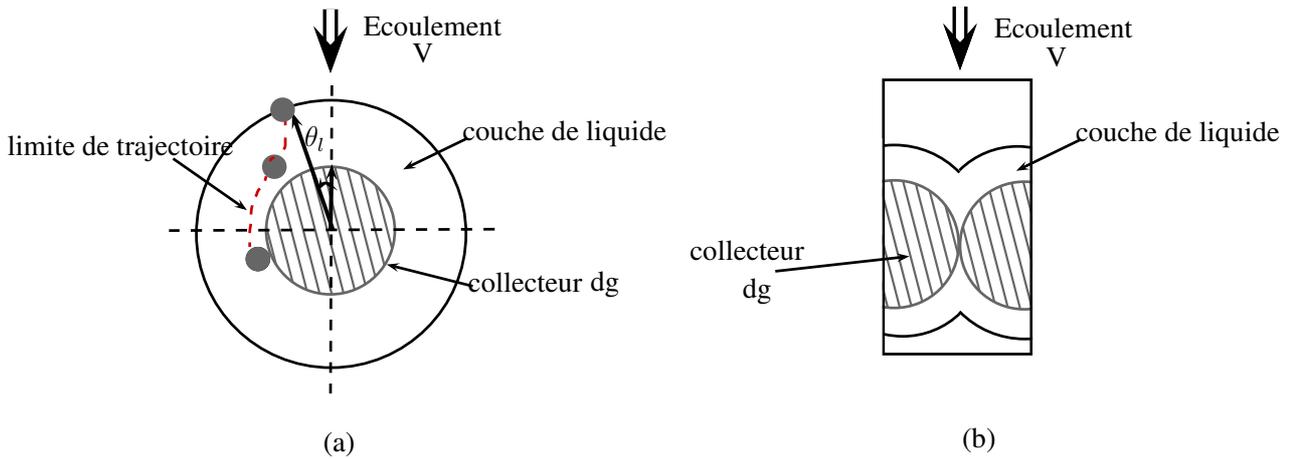


Figure 4.4 – Les modèles sphériques : (a) modèle de Happel *sphere-in-cell* (Happel, 1958), (b) modèle *Hemisphere-in-cell* (Ma et Johnson, 2010).

En appliquant le modèle *sphere-in-cell*, Yao *et al.* (1971) considèrent les mécanismes de sédimentation, interception directe et diffusion afin de déterminer le nombre de particules en suspension qui se déposent autour du collecteur. Ils déterminent l'efficacité du collecteur η qui correspond au taux de particules qui approchent et se déposent autour du collecteur ; tout cela en fonction de la taille des particules fines, du diamètre des grains collecteurs sphériques, de la porosité du milieu, de la vitesse de l'écoulement dans la couche de fluide et des masses volumiques de l'eau et des particules en suspension.

Il existe une amélioration du modèle *sphere-in-cell*, Ma et Johnson (2010) ont proposé de prendre en compte la zone où les collecteurs se touchent en présence de forces répulsives, c'est le modèle *hemisphere-in-cell* (Figure 4.4b). Ce modèle permet d'intégrer la considération que le dépôt de particules en milieu poreux qui était pris seulement en surface autour du collecteur, peut aussi être pris entre les grains.

4.2.4 Les modèles phénoménologiques

Les modèles phénoménologiques sont souvent utilisés pour l'analyse de transport des particules en suspension. Ils sont essentiellement basés sur les équations macroscopiques de conservation et de continuité (Herzig *et al.*, 1970). Les premiers modèles de ce type ont été développés par Ives (1960), où les paramètres empiriques s'obtiennent par ajustement sur les courbes expérimentales. Cependant, les équations macroscopiques ne considèrent pas les mécanismes de rétention à l'échelle du pore, or la filtration des particules est très largement affectée par la structure porale du milieu. Par exemple, dans le cas d'un dépôt de particules par gravité, la particule peut être captivée ou relarguée suivant les forces existantes à l'échelle locale du pore.

Afin d’y remédier nous allons utiliser le modèle d’analyse de trajectoire pour déterminer l’efficacité du filtre et l’introduire dans la cinétique de dépôt. Nous verrons tout cela en détail dans les paragraphes qui suivent.

4.2.5 Choix du type de modèle de filtration

La disponibilité de tant de modèles soulève une question : quel est le modèle le mieux adapté pour étudier la filtration en lit profond ?

En utilisant les données expérimentales obtenues sur le transport en colonne de laboratoire, le modèle de filtration phénoménologique est développé par le biais des équations macroscopiques de transport. La cinétique de dépôt est approchée en prenant en compte l’influence des facteurs qui contrôlent le taux de dépôt de particules et qui interviennent lors d’interaction entre les particules et les collecteurs (observés dans le chapitre précédent). Le modèle établi sera par la suite comparé aux résultats expérimentaux obtenus avec les expériences de transport en colonne de laboratoire afin d’examiner sa validé.

4.3 Approche macroscopique du problème de la filtration

L’intérêt fondamental de la théorie de filtration en profondeur est de pouvoir développer des modèles afin de prédire la performance des filtres à éliminer des particules. Dans ce but, des essais expérimentaux ont été effectués puis modélisés afin de développer des modèles numériques. La filtration permet de faire le lien entre un coefficient macroscopique de dépôt (K_d ou bien λ_d) trouvé expérimentalement qui peut varier en fonction de la vitesse (Benamar *et al.*, 2007), ou bien en fonction du rapport du diamètre des particules fines sur le diamètre des collecteurs ($\frac{d_p}{d_g}$) (Porubcan et Xu, 2011). Par ailleurs, le coefficient de dépôt peut être extrait de l’analyse de la trajectoire des particules à l’échelle du collecteur et cela en déterminant l’efficacité du collecteur à retenir les particules par le biais de différentes forces et interactions dans le milieu. Les paragraphes suivants vont décrire la filtration macroscopique et les paramètres estimés.

Le transport des particules fines en suspension est réalisé dans un milieu poreux parfaitement saturé en eau, constitué d’une matrice granulaire qui ne subit aucun mouvement des collecteurs les uns par rapport aux autres, ce qui établit un milieu poreux stable (pas d’érosion ni de tassement). Selon les conditions physico-chimiques et les propriétés géométriques des particules et des collecteurs, le transport des particules fines est accompagné d’un dépôt de particules autour des collecteurs. Parfois le dépôt est suivi d’un relarguage des particules fines dans le milieu causé par le détachement de ces particules, soit par les forces locales ou bien

par des changements dans les conditions initiales (notamment hydrauliques durant les essais de filtration).

Les mécanismes de transport de fluide en milieux poreux ont été largement décrits dans des études antérieures (Bear, 1972; McDowell-Boyer *et al.*, 1986; Zaiter-AlHouayek, 2005) et nous ne nous attarderons pas à les décrire en détails. Les particules en suspension dans le fluide sont transportées à travers le milieu et subissent entre autres des phénomènes de convection, diffusion et dispersion. Dans la suite, les équations de conservation de la masse du fluide et de conservation de la masse des particules en suspension sont écrites.

4.3.1 Conservation de la masse du fluide

L'écoulement dans un milieu poreux est gouverné par la loi de conservation de masse. La variation de la teneur en eau massique est égale à la masse d'eau apportée par le flux d'eau massique, l'équation de conservation de masse des fluides s'écrit :

$$\frac{\partial(\rho_f \cdot \phi)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho_f \cdot v) \quad (4.1)$$

La vitesse moyenne d'infiltration v est déterminée par la loi de Darcy à « l'échelle macroscopique », elle fait intervenir le débit volumique d'eau Q et la surface totale de la section du filtre A , telle que $v = \frac{Q}{A}$. L'eau s'écoule à travers les pores dans les volumes des vides, par conséquent, la vitesse v est fictive étant donné que toute la surface A du filtre est incluse de même que les surfaces des grains-collecteurs. Afin d'étudier le mouvement des particules dans le milieu, la vitesse réelle d'écoulement dans les pores est nécessaire. Si on suppose que la fraction volumique de deux phases (mobiles et immobiles) et par conséquent la porosité est identique à la fraction surfacique de ces deux entités, la vitesse dans les pores peut être définie comme le rapport entre la vitesse de Darcy et la porosité du milieu $u = \frac{v}{\phi}$.

L'équation de la loi de Darcy généralisée pour un écoulement laminaire, sans aucune turbulence s'écrit :

$$v = u \cdot \phi = \frac{-k}{\mu} \nabla (P + \rho_f \cdot g \cdot z) \quad (4.2)$$

avec :

ρ_f : masse volumique du fluide [kg/m^3];

v : vitesse moyenne du fluide [m/s];

u : vitesse du fluide à l'échelle des pores [m/s];

ϕ : porosité du milieu granulaire, $\phi = V_w/V_T$;

k : perméabilité géométrique [m^2];

μ : viscosité dynamique [kg/m/s] ;

P : pression [N/m²] ;

g : accélération de la pesanteur [m/s²].

En insérant l'équation 4.2 dans l'équation 4.1, nous obtenons l'équation de conservation de la matière pour le fluide tel que :

$$\frac{\partial(\rho_f \cdot \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \cdot \frac{-k}{\mu} \nabla(P + \rho_f \cdot g \cdot z)) = 0 \quad (4.3)$$

4.3.2 Conservation de la masse des particules en suspension

En régime d'écoulement permanent et en conditions saturées, la conservation de la masse des particules fines de kaolinite et leur transport à travers un milieu poreux sableux peuvent être représentés par un problème macroscopique de transport (convection-diffusion des particules en suspension (Bear et Bachmat, 1991)). L'équation macroscopique s'écrit :

$$\frac{\partial(\phi \cdot C)}{\partial t} = \nabla \cdot (\phi \cdot D_H \cdot \nabla C) - \nabla \cdot (u \cdot \phi \cdot C) + R \quad (4.4)$$

où R représente le taux de disparition ou de génération de la masse. Cette équation va décrire le transport des particules d'une concentration C [g/l], parcourues dans le milieu de dimension (x, y, z) durant un certain temps t . Le transport des particules se fera par **advection** appelé aussi **convection** à une vitesse des pores u [m/s], ajouté à cela nous aurons deux autres phénomènes couplés qui interviennent dans le transport :

- la **diffusion moléculaire** : mouvement des particules fines par la présence d'un gradient de concentration. Il est indépendant de l'advection et dépend du mouvement brownien des particules. Le flux dû à la diffusion est exprimée par la loi de Fick :

$$F = -D_d \cdot \nabla C \quad (4.5)$$

où, ∇C décrit le gradient de concentration et D_d [m²/s] représente le coefficient de diffusion dans l'eau sans tenir compte de la tortuosité ω pour contourner les grains de sables. Ainsi, il faut prendre en considération un coefficient de diffusion effectif $D_0 = \omega \cdot D_d$. Le coefficient de tortuosité doit être inférieur à 1 (Bear, 1972). Le coefficient de diffusion moléculaire ne varie pas significativement avec la concentration mais dépend de la température.

- la **dispersion mécanique** est associée d'une part à la vitesse du fluide qui peut être plus ou moins forte suivant que la particule se trouve au centre du pore (grande vitesse), ou bien que la particule se trouve sur les bords des pores (faible vitesse) (Figure 4.5a) et

d'autre part à la structure complexe du milieu poreux (Figure 4.5b, qui affecte le trajet emprunté par les particules.

Les phénomènes de dispersion mécanique sont représentés par une loi de Fick. Selon cette hypothèse, le flux de matière traversant une surface A par dispersion mécanique s'écrit :

$$F = -D_{dm} \cdot \nabla C \quad (4.6)$$

où $D_{dm}[\text{m}^2/\text{s}]$ est le tenseur de dispersion.

$$[D_{dm}] = \begin{pmatrix} \alpha_T \cdot |u| & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T \cdot |u| & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L \cdot |u| \end{pmatrix}$$

On distingue deux types de dispersions, selon que l'on est dans la direction du flux pour la quelle on aura une dispersivité longitudinal α_L , ou bien on est dans la direction normale au flux et on aura une dispersivité transversale α_T). Le tenseur de dispersion est $D_{dm} = \alpha_i \cdot |u| e_i \otimes e_i$.

D'une manière générale, le coefficient de dispersion est obtenu par ajustement des résultats numériques (modèles d'application en cours) sur les résultats expérimentaux (essais de percolation). [Zaiter-AlHouayek \(2005\)](#) propose dans une recherche bibliographique sur les modèles hydrauliques, divers façon d'estimer α

- À l'échelle des pores-grains, $\alpha_L \simeq d_g$, il peut être assimilé à la taille moyenne des grains et $\alpha_T = 0, 1 \cdot \alpha_L \text{m}$;
- Essais de laboratoire sur du sable, $1e^{-4} \leq \alpha_L \leq 1e^{-2} \text{m}$;
- Essais sur sites, ou des tests à gradients naturels, $1e^{-2} \leq \alpha_L \leq 1 \text{m}$;
- Essais sur sites, ou des valeurs de calage des résultats numériques sur résultats expérimentaux, $1 \leq \alpha_L \leq 100 \text{m}$.

Ces valeurs de dispersivité ajustées par des modèles numériques peuvent être d'une grande incertitude, dans le cas de nos essais on utilisera le diamètre moyen des grains comme valeur initiale pour la dispersivité longitudinale.

Les deux phénomènes de diffusion moléculaire et de dispersion mécanique ne peuvent être séparés dans le mouvement des particules. Ces deux processus sont alors couplés et traduits par un seul terme : tenseur de **dispersion hydrodynamique** D_H , de tel sorte que :

$$[D_H] = \begin{pmatrix} \alpha_T \cdot |u| + D_0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T \cdot |u| + D_0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_L \cdot |u| + D_0 \end{pmatrix}$$

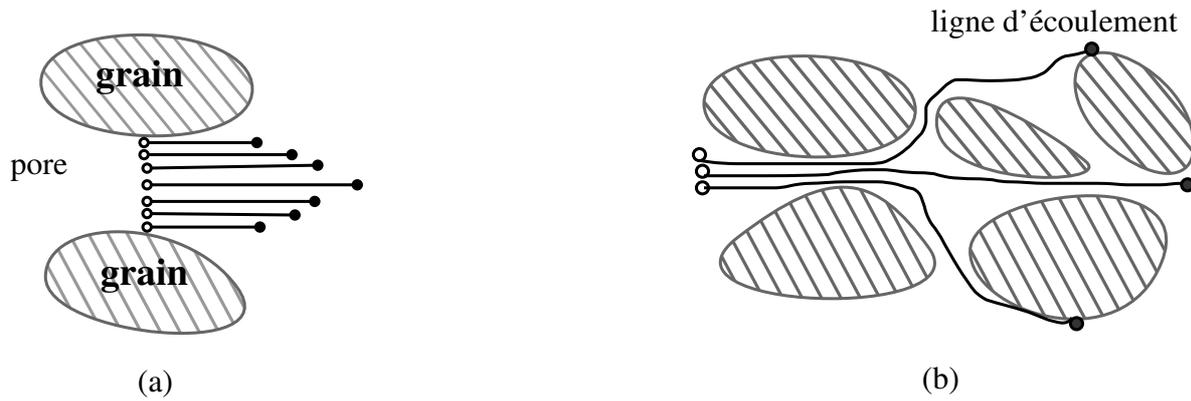


Figure 4.5 – (a) La distribution des vitesses au sein d'un pore, (b) La distribution des pores et la tortuosité du milieu.

Afin de déterminer l'importance de la diffusion moléculaire par rapport à la dispersion mécanique, le nombre de Péclet est utilisé. Ce nombre adimensionnel caractérise le rapport de la convection et la diffusion $Pe = l \cdot u / D_0$, où l est une grandeur caractéristique du milieu traversé. [Zaiter-AlHouayek \(2005\)](#) utilise le diamètre moyen des grains pour caractériser l . Étant donné que la dispersion hydrodynamique est une fonction croissante du nombre de Péclet, la valeur de ce dernier déterminera l'influence de chaque phénomène.

En calculant : $Pe = d \cdot u / D_0$, avec d : diamètre des grains moyen, $D_0 = 0,9 \cdot 10^{-9}$, nous trouvons un nombre de Péclet entre 160 et 600, ce qui veut dire que la dispersion hydrodynamique est principalement due à la dispersion mécanique et que nous pouvons négliger la diffusion.

Dans un milieu où le diamètre du lit filtrant (diamètre intérieur de la colonne) est beaucoup plus important que le diamètre des grains du filtre, l'écoulement radial peut être ignoré et l'écoulement est considéré unidirectionnel suivant le sens (z) de l'écoulement ([Zamani et Maini, 2009](#)). On peut écrire l'équation 4.4 comme cela :

$$\frac{\partial(\phi \cdot C)}{\partial t} = D_L \cdot \phi \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \cdot \phi \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + R \quad (4.7)$$

z est la profondeur du filtre dans la colonne et D_L est la dispersion hydrodynamique longitudinale. La masse transportée interagit avec le milieu poreux et elle est représentée par le terme R dans l'équation 4.7. Les différents phénomènes et les réactions font qu'une partie de la masse injectée initialement se dépose et l'autre partie est mobile en suspension (Ceci est représenté dans la figure 4.6). En récapitulant les principaux procédés pouvant intervenir, nous avons :

- Le blocage géométrique appelé « straining » peut se produire : (i) dans les pores plus

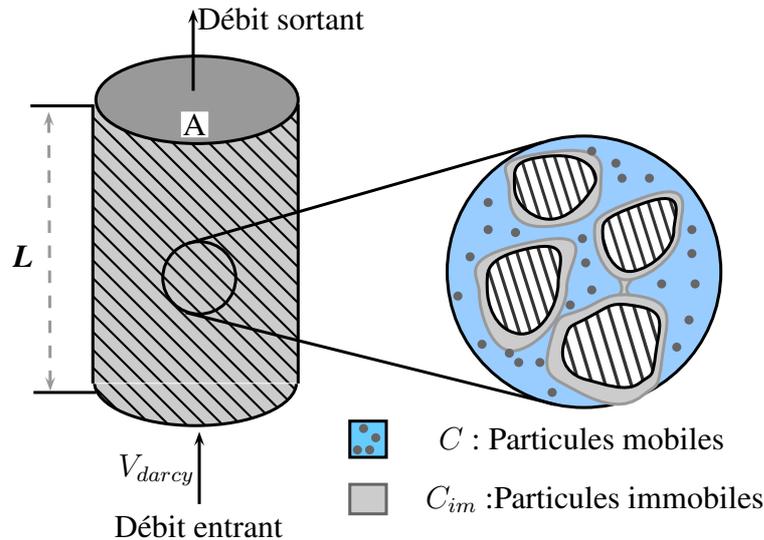


Figure 4.6 – Schéma représentatif du milieu granulaire ainsi que le dépôt et transport de particules dans le pore.

petits que les particules (Bradford *et al.*, 2002, 2003), (ii) au niveau des points de contacts entre deux grains de sables, (iii) ou bien cela se produit dans les gorges des petits pores, dans lesquelles la vitesse de l'eau est très faible et le mouvement de l'eau est considéré pratiquement immobile ;

- Le dépôt des particules à la surface d'un collecteur, par des réactions physico-chimiques. Le mécanisme est appelé « attachment » dû à des interactions entre les collecteurs et les particules (théorie D.L.V.O). Suivant la barrière d'énergie, les conditions peuvent être favorables ou bien défavorables pour l'attachement des particules (Ryan et Elimelech, 1996) ;
- Les particules déposées peuvent être réentraînées à nouveau dans la circulation. Ce mécanisme de détachement est impliqué par les réactions entre deux particules qui peuvent être attractives ou répulsives suivant la nature des surfaces et la solution chimique, ainsi que des changements brutaux dans les écoulements (Herzig et Goff, 1972a).

Afin de représenter les interactions entre les particules du filtre et la solution injectée, le terme du taux de dépôt sera représenté dans l'équation 4.7, comme cela :

$$C \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \cdot \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \cdot \phi \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \cdot \phi \cdot \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (4.8)$$

σ représente le « dépôt spécifique » des particules fines qui est défini comme la masse de particules déposées M_{im} par le volume du milieu (i.e. $\sigma = M_{im}/V_T$). Nous pouvons relier le dépôt spécifique σ à la concentration de particules immobiles déposées C_{im} , définie comme la masse de particules immobiles par le volume des pores, on trouve alors :

$$C_{im} = \frac{M_{im}}{V_v} = \frac{M_{im}}{\phi_0 \cdot V_T} = \frac{\sigma}{\phi_0} \quad (4.9)$$

4.3.3 Taux de dépôt

Le terme $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$ détermine le taux de dépôt, il est associé à plusieurs grandeurs (*e.g.* les diamètres des collecteurs et les particules fines, les tailles des pores disponibles, les débits d'injections utilisés, les conditions physico-chimiques, le pH, les charges électriques entre autres). Dans le cadre de nos recherches, les essais de filtration sont réalisés pour des particules en suspension de dimensions entre $(0, 1 - 2)\mu\text{m}$, dans des filtres de sables de dimensions entre $(0,3-2)\text{mm}$. Les dimensions des tailles des pores de sables sont de l'ordre de $(100 - 400\mu\text{m})$. La taille des colloïdes est un paramètre important pour déterminer quel type de filtration est prédominante dans le filtre. [Herzig *et al.* \(1970\)](#) définissent un rapport entre le diamètre de colloïdes d_p et le diamètre des collecteurs du filtre d_g supérieur à 0,05 ($\frac{d_p}{d_g} > 0,05$), pour qu'il y'ait piégeage des colloïdes dans les pores. Toutefois, des travaux plus récents par [Bradford *et al.* \(2002, 2003\)](#), préconisent plus de prudence sur le rapport du diamètre des colloïdes sur le diamètre médian des collecteurs et pensent que les travaux de [Herzig *et al.* \(1970\)](#) sous-estiment le piégeage des particules qui peut se produire pour un rapport beaucoup plus faible de 0,0017.

Dans nos essais, les particules fines qui circulent à travers des pores sont 50 à 4000 fois plus petites que les collecteurs. Par conséquent, les particules fines non agglomérées et qui sont transportées ne sont pas capturées directement, cela peut se produire si elles sont proches des surfaces des grains. En revanche, les particules qui forment des agglomérats sont susceptibles d'être piégées dans le cas de la nouvelle condition de [Bradford *et al.* \(2002, 2003\)](#). Ainsi, les particules dans le milieu subissent le dépôt dans les pores par le biais de deux phénomènes : le dépôt par attachement à la surface des collecteurs, dans le cas de particules détachées et le dépôt par blocage géométrique « straining », ce dernier n'est pas prédominant dans la première partie du dépôt (cas d'étude pour un lit de sable encore propre, au début de l'essai) mais susceptible de se produire dans la deuxième partie du dépôt pour des agglomérats de particules.

4.4 Théorie de la filtration

La théorie de la filtration permet de faire le lien entre l'efficacité du milieu poreux à filtrer les particules fines et le coefficient de dépôt qui tient compte des différents mécanismes de dépôt-relarguage évoqués plus-haut.

[Iwasaki \(1937\)](#) proposa pour la première fois, grâce à un bilan de matière, la variation de la concentration des particules déposées avec la distance. Il admit une augmentation linéaire du

coefficient de filtration K_d en fonction de la concentration dans le filtre C :

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -K_d \cdot C \quad (4.10)$$

Depuis [Iwasaki \(1937\)](#), il est courant de décrire l'efficacité du filtre à éliminer les particules en terme de K_d . Meilleure est l'efficacité de filtration d'un milieu quand K_d augmente. Ce coefficient de filtration est un paramètre important, intervenant dans plusieurs théories de filtration. Il dépend des mécanismes de transport et de dépôt, par conséquent, affecté par le blocage des particules. Étant donné qu'un bilan de matière dans la couche d'épaisseur dz s'écrit :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -v \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4.11)$$

On obtient l'équation cinétique d'Iwasaki (équation [4.10](#)), de la forme :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = v \cdot K_d \cdot C \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda \cdot C \quad (4.13)$$

Le coefficient K_d [1/m] de filtration peut être constant durant un essai. [Herzig *et al.* \(1970\)](#) définissent le coefficient de filtration comme la densité de probabilité de capture des particules par unité d'épaisseur. Il est courant de trouver dans la littérature que λ [s⁻¹] dépend de λ_0 et un paramètre de dépôt σ , tel que :

$$\lambda = f(\lambda_0, \sigma) \quad (4.14)$$

L'équation [4.13](#) est une réaction du premier ordre en cinétique chimique. Cependant, ce phénomène est observé seulement dans un milieu encore propre (durant le début de la filtration), où on est dans le cas de la cinétique de filtration du premier ordre. Or après l'accumulation des particules, λ dépend de la concentration des particules déjà retenues dans le filtre et de la fraction du milieu poreux encore disponible à retenir des particules, cela contraint à passer à la cinétique du second ordre. Nous exposerons dans les paragraphes suivants de plus amples détails sur les différents taux de filtration proposés dans la littérature.

4.4.1 Cinétique de la filtration du premier ordre

Il existe plusieurs formes du terme de filtration $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$ dans la littérature ([Herzig *et al.*, 1970](#); [Saiers et Hornberger, 1994](#); [Benamar *et al.*, 2007](#)). Une écriture souvent exposée entre le terme de dépôt σ et la concentration de particules fines C est présentée dans l'équation [4.15](#). Ce

terme de filtration du premier ordre ne prend pas en compte le dépôt accumulé dans le milieu poreux. Selon cette équation, les particules fines dans la solution peuvent se déposer dans les collecteurs selon un coefficient de dépôt λ_d et selon certaines conditions dans la solution, ces mêmes particules peuvent être remises en suspension par relarguage ou détachement, pour un coefficient λ_r . Les deux termes obéissent à une cinétique du premier ordre.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda_d \cdot C - \lambda_r \cdot \sigma \quad (4.15)$$

λ_d et λ_r [s⁻¹] représentent respectivement les coefficients de la cinétique de premier ordre du dépôt et du relarguage.

Bradford *et al.* (2002, 2003); Bradford et Bettahar (2006) décomposent la cinétique de dépôt en fonction de la phase de dépôt par straining et de la phase de dépôt par attachement, ce qui donne :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = E^{att} + E^{str} \quad (4.16)$$

Les termes de dépôt sont représentés ainsi :

$$E^{att} = \lambda_{att} \cdot \psi_{att} \cdot C - \lambda_{det} \cdot \sigma \quad (4.17)$$

$$E^{str} = \lambda_{str} \cdot \psi_{str} \cdot C \quad (4.18)$$

λ_{att} et λ_{str} [1/s] représentent respectivement les coefficients de la cinétique de premier ordre du dépôt par attachement et par straining. λ_{det} [1/s] représente le coefficient de détachement des particules fines du premier ordre. ψ_{att} une fonction adimensionnelle qui représente le dépôt par attachement, elle est égale à 1 pour un filtre propre et s'applique dans ce cas à la cinétique de premier ordre. ψ_{str} est une fonction adimensionnelle pour un blocage par straining des particules. Bradford *et al.* (2002) ont montré expérimentalement sur des colonnes de sables que le blocage par straining dépend fortement de la profondeur z , de tel sorte que le dépôt par straining se produit principalement à l'entrée de l'injection, cette fonction de rétention est définie par :

$$\psi_{str} = \left(\frac{d_{50} + z}{d_{50}} \right)^{-\beta^*} \quad (4.19)$$

β^* est un paramètre expérimental qui prend en compte la forme des colloïdes, le paramètre d_{50} est utilisé comme un substitut de la taille de pore (représenté par la taille médiane des grains collecteurs). Par ailleurs, Le facteur λ_{str} est fonction du rapport des diamètres de particules fines sur la diamètre moyen des grains, de tel sorte que pour un $\beta^* = 0,43$, Bradford *et al.* (2002), définissent une corrélation entre λ_{str} et dp/d_{50} :

$$\lambda_{str} = 269,7 \left(\frac{dp}{d_{50}} \right)^{1,42} \quad (4.20)$$

4.4.2 Cinétique de la filtration du second ordre

Dans la cinétique du premier ordre il est supposé que le filtre est toujours propre avec un coefficient de filtration λ constant, cela peut s'appliquer dans les premiers moments de l'essai pour des concentrations de particules fines déposées occupant un faible volume dans les pores. Néanmoins les changements effectués dans le milieu poreux par les quantités de particules déposées modifient considérablement le volume des pores. Cela implique que le coefficient de filtration dépend à la fois de la concentration de particules mobiles dans l'eau mais aussi de la capacité du milieu à pouvoir encore retenir les particules. Dans ce cas on parle de cinétique du second ordre (Saiers et Hornberger, 1994; Kim et Whittle, 2006), que l'on peut écrire :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda_0 \cdot F(\sigma) \cdot C \quad (4.21)$$

où $\lambda_0[1/s]$ est un coefficient empirique de filtration pour un filtre initialement propre. Il va dépendre de plusieurs paramètres dont : le diamètre des gains collecteurs d_g , le diamètre des particules fines d_p , la vitesse de filtration v ainsi que la viscosité dynamique de l'eau μ . Ives et Sholji (1965) cité dans Zhao (1994), mettent en évidence une relation entre les différents paramètres :

$$\lambda_0 \propto d_p^a \cdot v^b \cdot \mu^c \cdot d_g^s \quad (4.22)$$

où, a, b, c, s sont des paramètres empiriques déterminés expérimentalement. Ives (1969) estime la valeur de λ_0 d'une kaolinite dans un milieu constitué de petites billes, il propose une expression similaire telle que :

$$\lambda_0 = 2 \cdot 1e^{-2} \cdot \mu^{1,4} \cdot d_p^{0,3} \cdot v^{-4} \cdot d_g^{1,4} \quad (4.23)$$

Nous verrons dans la prochaine section que λ_0 peut aussi être déterminé en intégrant l'efficacité du filtre.

Concernant la fonction de rétention $F(\sigma) = \lambda/\lambda_0$, elle est déduite des essais expérimentaux. Nous trouvons dans la littérature trois directions possibles pour définir l'expression du mécanisme de dépôt :

1. Le premier cas où la fonction $F(\sigma)$ augmente, ce qui signifie que la capacité du filtre à éliminer les particules s'améliore à mesure que le dépôt augmente et que le milieu poreux

se colmate. [Iwasaki \(1937\)](#) donne la relation de λ comme une fonction monotone croissante en fonction de σ .

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot \sigma) \quad (4.24)$$

avec $b > 0$ un paramètre expérimental.

2. Le deuxième cas, contrairement au premier cas, la performance du filtre est diminuée avec l'augmentation du dépôt σ . La fonction $F(\sigma)$ est monotone décroissante. L'expression proposée par [Mehter *et al.* \(1970\)](#) s'écrit :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 - b \cdot \sigma) \quad (4.25)$$

[Heertjes et Lerk \(1967\)](#) quand à eux proposent une fonction décroissante, faisant intervenir le milieu poreux :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\phi_0}\right) \quad (4.26)$$

[Maroudas et Eisenklam \(1965\)](#) déterminent une fonction $F(\sigma)$ dépendante de la capacité maximum qu'un milieu peut retenir σ_{max} (dépôt maximum dans les pores). L'expression est :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}\right) \quad (4.27)$$

3. Dans le troisième cas, la fonction $F(\sigma)$ présente une combinaison du comportement des deux cas précédents, c'est-à-dire que cette fonction va d'abord augmenter avec le dépôt et ensuite diminuer avec l'accumulation des particules dans les pores . [Ives \(1960\)](#); [Ives et Sholji \(1965\)](#), ont proposé l'expression suivante :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 + b \cdot \sigma - \frac{a \cdot \sigma^2}{\phi_0 - \sigma}\right) \quad (4.28)$$

[Ives \(1969\)](#) propose une équation générale de λ et le dépôt σ , regroupant plusieurs cas, dont chacun peut être une solution particulière de l'équation, l'expression est :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 + \frac{b \cdot \sigma}{\phi_0}\right)^{n_1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\phi_0}\right)^{n_2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}\right)^{n_3} \quad (4.29)$$

où $b > 0$ est une constante géométrique en relation avec l'arrangement des grains, n_1, n_2, n_3 sont des paramètres expérimentaux positifs et σ_{max} est la valeur maximale du dépôt spécifique dans le filtre.

[Zamani et Maini \(2009\)](#) regroupent les différentes fonctions $F(\sigma)$ dans une étude de l'état de l'art sur la filtration (Tableau 4.1)

Table 4.1 – Liste des expressions proposées dans la littérature de la fonction de rétention, $F(\sigma) = \lambda/\lambda_0$ d'après [Zamani et Maini \(2009\)](#).

expression	paramètres	auteurs
$F = 1 + b \cdot \sigma$; $b > 0$	b	(Iwasaki, 1937)
$F = 1 - b \cdot \sigma$; $b > 0$	b	(Mehter et al., 1970)
$F = 1 - \frac{\sigma}{\phi_0}$		(Heertjes et Lerk, 1967)
$F = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}$		(Maroudas et Eisenklam, 1965)
$F = \left(\frac{1}{1+b\sigma}\right)^n$; $b > 0$ $n > 0$	b, n	(Mehter et al., 1970)
$F = \left(\frac{\phi(\sigma)/\phi_0}{(\phi_0 - \sigma)/(1 - \phi)}\right)^n$	n	(Deb, 1969)
$F = \left(1 + \frac{b \cdot \sigma}{\phi_0}\right)^{n1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\phi_0}\right)^{n2}$; $b > 0$	b, n_1, n_2	(Mackrle et al., 1965)
$F = 1 + b \cdot \sigma - \frac{a \cdot \sigma^2}{\phi_0 - \sigma}$; $b > 0$, $a > 0$	a, b	(Ives, 1960)
$F = \left(1 + \frac{b \cdot \sigma}{\phi_0}\right)^{n1} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\phi_0}\right)^{n2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}\right)^{n3}$; $b > 0$	b, n_1, n_2, n_3	(Ives, 1969)

[Bradford et Bettahar \(2006\)](#) quand à eux définissent la fonction de dépôt par straining de particules (équation 4.18). Ils font intervenir la distance z parcourue par les colloïdes, ainsi que le dépôt maximum σ_{max} . Ils donnent une fonction décroissante en fonction du dépôt σ et de la distance z (profondeur du milieu). L'expression est la suivante :

$$\psi_{str} = \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}\right) \cdot \left(\frac{d_{50} + z}{d_{50}}\right)^{-\beta^*} \quad (4.30)$$

Le premier terme de l'équation 4.30 décroît en fonction de la capacité des sites de remplissage à pouvoir recevoir les particules, il varie entre 1 ($\sigma = 0$ au début de l'injection) et 0 ($\sigma = \sigma_{max}$ aucun site n'est disponible). Le second terme de l'équation suppose que le dépôt des particules survient principalement à l'entrée de la colonne ([Bradford et al., 2003](#)). Suite à des expériences menées par [Bradford et al. \(2002\)](#) sur des colloïdes dans différents milieux constitués de sables et de billes de verre, ils montrent que la rétention des colloïdes par straining se fait en grande majorité à l'entrée de la colonne, au point d'injection. Cela est dû au dépôt des colloïdes qui vont boucher les petits pores à l'entrée de la colonne.

Plus récemment, dans un modèle de rétention par straining uniquement de particules en latex dans des milieux sableux hétérogènes, [Porubcan et Xu \(2011\)](#) utilisent la formulation de ([Xu et al., 2006](#)) pour la saturation des sites de rétention, la formulation est la suivante :

$$F(\sigma) = e^{\frac{-\sigma}{\lambda_{xu}}} \quad (4.31)$$

λ_{xu} détermine à quelle vitesse la capacité de rétention sera diminuée essentiellement durant l'injection, due à l'accumulation de particules à l'intérieur des espaces poreux σ .

4.4.3 Prédiction du coefficient de filtration-dépôt

Le coefficient de filtration λ est basé sur l'efficacité du filtre à pouvoir retenir les particules. Il est analogue au coefficient de filtration (Herzig *et al.*, 1970), défini comme étant la probabilité de capture des particules par unité de temps. Le terme λ définit auparavant pour une cinétique du second ordre, dépend à la fois des particules déjà retenues et d'un coefficient de filtration initial.

$$\lambda = \lambda_0 \cdot F(\sigma) \quad (4.32)$$

Le coefficient de filtration initial λ_0 , pour le cas d'un filtre au début de l'injection, dépend à la fois des forces hydrodynamiques et des forces physico-chimiques qui s'exercent entre les particules en suspension et le milieu poreux (Herzig *et al.*, 1970; Delanchambre, 1966). Il dépend aussi de la vitesse du fluide, par exemple Benamar *et al.* (2007) montrent que le dépôt augmente lorsque la vitesse d'injection croît jusqu'à une vitesse critique à partir de laquelle le taux de dépôt diminue. Ceci peut être représenté par l'expression 4.33, où b_1 et b_2 sont des constantes.

$$\lambda = b_1 \cdot v - b_2 \cdot v^2 \quad (4.33)$$

Dans ce qui suit, la théorie de la filtration est utilisée pour faire le lien entre le coefficient de dépôt λ_0 et l'efficacité du collecteur η . Ils seront calculés pour un filtre propre par l'analyse de trajectoire dans un collecteur (*sphere-in-cell*) dans le modèle de Happel (1958). Zamani et Maini (2009) décrivent la formule de l'efficacité du collecteur à l'état initial de filtration en faisant une analogie entre l'équation d'Iwazaki 4.10 et l'efficacité d'un seul collecteur par la formule :

$$\lambda_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - \phi_0) \cdot v}{d_g} \cdot \eta_0 \quad (4.34)$$

Yao *et al.* (1971) présentent trois paramètres à additionner pour calculer l'efficacité du collecteur isolé; la diffusion η_D , l'interception directe η_i et la sédimentation η_s ($\eta_0 = \eta_D + \eta_i + \eta_s$). Depuis plusieurs auteurs ont raffiné l'équation de l'efficacité du collecteur, parmi les auteurs, Rajagopalan et C.Tien (1976) donnent une forme plus précise de l'efficacité d'un collecteur isolé en utilisant le modèle de Happel. Sur la base de données expérimentales à l'échelle macroscopique, l'équation de l'analyse de trajectoire sous différentes conditions qui estime la probabilité de collision est donnée par :

$$\eta_0 = \left[4 \cdot A_s^{1/3} \cdot (N_{pe})^{-2/3} + A_s \cdot \left(\frac{H}{\mu \cdot d_p^2 \cdot v} \right)^{1/8} \cdot N_R^{15/8} + 3,38 \cdot 10^{-3} A_s \cdot \left(\frac{v_s}{v} \right)^{1,2} \cdot N_R^{-0,4} \right] \quad (4.35)$$

avec :

$$A_s = \frac{1 - \theta^5}{1 - \frac{3}{2} \cdot \theta + \frac{3}{2} \cdot \theta^5 - \theta^6} \quad (4.36)$$

A_s : paramètre de porosité issu du modèle *sphere-in-cell* (Happel, 1958), avec $\theta = (1 - \phi_0)^{1/3}$;
 H : constante d'Hamaker, elle est caractéristique des surfaces et de l'ordre de $10^{-19} J$ (Ghidaglia, 1994) ;

$N_R = d_p/d_g$: aspect géométrique ; $v_s = \frac{g}{18 \cdot \mu} (\rho_{sp} - \rho_f) \cdot d_p^2$: vitesse de sédimentation ;

$N_{pe} = \frac{v \cdot d_p}{D_0}$: nombre de Péclet qui définit le rapport entre la convection et la diffusion D_0 .

L'efficacité du collecteur η_0 est définie comme le rapport du taux des particules déposées sur le taux des particules approchées. Il pourrait y avoir une différence entre l'efficacité estimée à partir de calage sur des courbes expérimentales et celle calculée expérimentalement. Dans cette perspective l'efficacité réelle du collecteur peut être exprimée en fonction de l'efficacité théorique du collecteur et d'un coefficient d'ajustement des mécanismes physiques qui ne sont pas pris en compte, soit ($\eta = \alpha \cdot \eta_0$). Pour $\alpha = 1$, nous avons des conditions favorables pour que toutes les collisions aboutissent à un dépôt. Le terme de dépôt s'exprime alors en fonction de l'efficacité théorique du collecteur η_0 et d'une fonction de filtration qui traduit la capacité qu'un milieu poreux a de retenir les particules, reliée aux volumes des pores encore disponibles.

Dans des essais de filtration, Xu *et al.* (2008) ont étudié l'influence des particules sphériques et non sphériques en suspension à travers des sables uniformes. Ils en déduisent que la forme de la particule non sphérique mais plutôt ellipsoïdale tend à adopter une orientation privilégiée durant l'écoulement. Son axe principal tend à s'aligner avec le sens de l'écoulement local, ce qui change le rapport d_p/d_g qui influence étroitement le calcul du coefficient η_0 et donc la cinétique de dépôt (Bradford *et al.*, 2002, 2003; Xu *et al.*, 2008; Porubcan et Xu, 2011). Les résultats des essais de filtration de Xu *et al.* (2008) montrent que η_0 varie linéairement avec le rapport de la taille des particules fines et la taille des grains de sable (d_p/d_{g50}). Bradford *et al.* (2002, 2003) ont réalisé des expériences en utilisant différentes tailles de sables sphériques et des mélanges de sables dans des conditions particulières, afin d'écarter le dépôt physico-chimique par attraction et de n'avoir un dépôt que par blocage géométrique dans des pores étroits « *straining* ». Ils ont observé une relation linéaire entre le coefficient de dépôt et le rapport de la taille des particules fines sur la médiane de taille des grains des différents mélanges d_p/d_{g50} .

4.4.4 Synthèse sur le modèle de filtration

Le terme de dépôt λ est un paramètre macroscopique déterminant dans la théorie de filtration. Dans certains modèles, il permet de faire intervenir les différents mécanismes à l'échelle

locale par le modèle *sphere-in-cell*, dans d'autres il fait intervenir des grandeurs macroscopiques tel que d_p/d_g , ou bien la distance z parcourue dans le milieu.

L'objectif de notre modèle est de pouvoir prédire l'évolution de la perméabilité des filtres en changeant différents paramètres : débit, porosité initiale, diamètre des grains du filtre, diamètre des particules fines et concentration des particules fines injectées. Le terme de dépôt est déterminé par le modèle *sphere-in-cell*, en faisant intervenir les mécanismes de sédimentation, de diffusion et d'interception directe rencontrés à l'échelle locale. Une fonction de filtration est déterminée par calage sur les essais expérimentaux. En utilisant le principe de parcimonie, nous avons voulu diminuer au maximum les coefficients de calage expérimentaux afin d'avoir un modèle simple et robuste qui s'appliquera dans les différentes conditions citées plus haut. Étant donné le nombre réduit des essais réalisés, nous avons choisi de caler les différents coefficients en utilisant les essais à 100ml/mn et à 30ml/mn (pour les différents porosités enregistrées le long de la colonne) et d'appliquer le modèle pour l'essai S3 avec un débit différent de 60ml/mn pour vérifier sa validation.

4.5 Modèle macroscopique développé

La modélisation macroscopique du phénomène de transport-dépôt des particules dans le milieu est réalisée par l'équation 4.8 de convection-dispersion, avec un terme puits décrit par :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \phi_0 \cdot \frac{\partial C_{im}}{\partial t} \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \lambda_0 \cdot F(C_{im}) \cdot C \quad (4.38)$$

Ce terme dépend du coefficient de dépôt λ_0 [1/s] dans un filtre encore propre et de la fonction de rétention $F(C_{im})$. Cette fonction fait intervenir la saturation des sites de rétention des particules au fur et à mesure jusqu'à atteindre la capacité maximale que le milieu poreux est capable de recevoir $C_{im,max}$.

Dans le cas d'une cinétique de premier ordre, la rétention des particules autour des collecteurs est indépendante des particules qui s'y trouvent déjà bloquées dans les différents sites de rétention, interprétée par $F(C_{im}) = 1$. Dans ce cas, nous estimons le dépôt $\lambda = \lambda_0$ à partir de l'efficacité du filtre η_0 et un terme composé de la porosité initiale et le diamètre représentatif des grains qui constituent le milieu poreux (équation 4.34). L'efficacité du filtre η_0 est la somme des différents mécanismes de capture dominant autour d'un collecteur. [Tien et Payatakes \(1979\)](#) déterminent les mécanismes à l'échelle du collecteur par la sédimentation, la diffusion et l'interception directe (équation 4.35).

La résolution des équations de transport-dépôt nécessite la connaissance des conditions aux limites à l'entrée et à la sortie de la colonne, ainsi que les conditions initiales de la colonne.

4.5.1 Mise en équation du problème

Les équations qui gouvernent la filtration en profondeur des particules fines dans un milieu granulaire ont été discutées plus-haut. Nous avons :

$$\frac{\partial(\rho_f \cdot \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_f \cdot \frac{-k}{\mu} \nabla (P + \rho_f \cdot g \cdot z) \right) = 0 \quad (4.39)$$

$$C \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} + \phi \cdot \frac{\partial C}{\partial t} - D_L \cdot \phi \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + u \cdot \phi \cdot \frac{\partial C}{\partial z} + \phi_0 \cdot \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = 0 \quad (4.40)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\beta \cdot \phi_0}{\rho_p} \cdot \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = 0 \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial C_{im}}{\partial t} - \lambda_0 \cdot F(C_{im}) \cdot C = 0 \quad (4.42)$$

Le problème se résume à déterminer les variables P, C, ϕ, C_{im} couplées dans notre modèle, décrites par les équations (4.39, 4.40, 4.41, 4.42) et soumises aux conditions aux limites et aux conditions initiales.

Conditions aux limites , définies par :

Les conditions aux limites hydrauliques :

1. $Q/A = u$ ($z = 0, t$); flux imposé à l'entrée de la colonne par un débit constant ; $P(z = l, t) = 0$; pression imposée à la sortie de la colonne.

Les conditions aux limites de la concentration mobile C :

1. $C(z = 0, t) = C_0$; on impose une condition constante sur la concentration mobile à l'entrée de la colonne;

Conditions initiales de la colonne de test avant le début de l'injection :

1. $P(z, t = t_0) = P_0$; pression hydrostatique $\Delta P = -\rho_f \cdot g$.
2. $C(z, t = t_0) = 0$; pas de polluants présents dans la colonne avant l'essai de filtration ;
3. $\phi(z, t = t_0) = \phi_0(z)$; porosité initiale dans chaque point de la colonne;
4. $C_{im}(z, t = t_0) = 0$; concentration immobile nulle avant l'injection de particules.

Nous avons utilisé les équations suivantes dans le but d'étudier le transport-dépôt des particules :

$$k = \frac{\phi^3}{c \cdot (1 - \phi)^2 \cdot S^2} \quad (4.43)$$

$$F(C_{im}) = a \cdot \left(1 - \frac{C_{im}}{C_{im,max}} \right)^b \quad (4.44)$$

$$\lambda_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - \phi_0) \cdot v}{d_g} \cdot \eta_0 \quad (4.45)$$

$$D_H = \alpha_L |u| + D_0 \quad (4.46)$$

Ce problème peut être résolu à l'aide de méthodes numériques telle que la méthode des éléments finis, ou des différence finis entre autres. Dans le cadre de la thèse, nous avons utilisé un schéma différentiel sous matlab et un logiciel d'éléments finis : comsol multiphysics.

Dans le modèle, certains paramètres introduits dans les équations (4.39, 4.40, 4.41, 4.42) sont issus des essais expérimentaux. Le tableau 4.2 expose les paramètres expérimentaux nécessaires et les appareils utilisés à cet effet.

Table 4.2 – Liste des paramètres expérimentaux utilisés dans le modèle.

paramètres	nom	méthodes de mesure
ρ [kg/m ³]	masse volumique totale	gammadensimètre
ρ_g [kg/m ³]	masse volumique solide des grains	pycnomètre
d_g [mm]	diamètre du sable	courbes granulométriques
d_p [μ m]	diamètre de l'argile	granulomètre laser
$v=u \cdot \phi_0$ [m/s]	vitesse de Darcy	imposé par une pompe péristaltique
ϕ_0	porosité initiale	gammadensimètre
β	volume d'eau mort	porosimètre à mercure

L'évolution de la perméabilité est prédite à partir du modèle de Kozeny-Carman (équation 4.43). Ce modèle prend en compte l'hétérogénéité du milieu pour chaque couche (ϕ_j, k_j), ainsi que l'évolution de la tortuosité du milieu. La surface spécifique est déterminée en fonction de la chronologie du dépôt. Au début de l'essai, les particules sont bloquées dans les pores autour des collecteurs de sables par *attachment* dans des sites de surface, par la suite une fois les sites de surfaces saturés, les particules sont déposées entre les collecteurs, créant des ponts entre les collecteurs. Ceci engendre une restructuration géométrique des pores.

D'autres paramètres importants pour la modélisation, liés au phénomène de dépôt dans le milieu sont déterminés dans la section suivante. Nous avons tenté d'expliquer chaque choix de paramètre afin de représenter au mieux la rétention des particules et lui donner un maximum de sens physique.

4.5.2 Étude des paramètres du modèle : $\lambda_0, C_{im,max}$

La détermination des paramètres $\lambda_0, C_{im,max}$ constitue une partie importante dans l'élaboration du modèle. Le terme λ_0 contrôle la première partie du dépôt dans un milieu poreux propre et le terme $C_{im,max}$ contrôle la seconde partie du dépôt, c'est-à-dire la capacité de rétention maximale dans les pores (traduit par la saturation dans les sites de dépôt). Chaque partie sera étudiée séparément, la première partie est représentée uniquement par le coefficient

de dépôt λ_0 , elle est interprétée par la cinétique de premier ordre. La deuxième partie prend en compte les particules déjà déposées dans les sites de rétention, elle est simulée par la cinétique du second ordre.

Résultats de la cinétique du premier ordre

Dans le cas d'une cinétique de premier ordre, la fonction $F(C_{im}) = 1$ et $\lambda = \lambda_0$. Le coefficient de dépôt λ_0 est estimé par l'efficacité du filtre à retenir les particules à l'échelle du pore (exprimé dans l'équation 4.45). Celle-ci prend en compte les trois mécanismes importants : la diffusion des petites particules λ_D , l'interception directe dans des sites de rétention λ_I et la sédimentation des grosses particules λ_S . Les différentes valeurs de $\lambda_0 = \lambda_D + \lambda_I + \lambda_S$ pour les différents milieux poreux expérimentés sont exprimées dans le tableau 4.3.

Table 4.3 – Tableau récapitulatif des valeurs de mécanismes de dépôt dans les différents filtres.

paramètres	S1 Gf-S	S2 Gf-E	S3 Gf-	S4 Gf-	S5 Gg-S	S6 Gm-S	S7 Gf-S	S8 Gf-S
q [ml/mm]	100	100	60	30	100	100	100	100
ϕ_0 [-]	0,42	0,39	0,32	0,32	0,4	0,36	0,4	0,48
d_g [mm]	0,39	0,46	0,46	0,46	1,2	0,7	0,39	0,39
d_p [μm]	1	1	1	1	1	1	1	1
λ_D [1/s]	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
λ_I [1/s]	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
λ_S [1/s]	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
λ_D : dépôt par diffusion ; λ_I : dépôt par interception directe ; λ_S : dépôt par sédimentation								

Les figures suivantes illustrent les valeurs théoriques du taux de dépôt λ_0 (par l'équation 4.45), fonction de la porosité, du diamètre des grains et de la vitesse d'injection. Les concentrations choisies sont constantes et les particules injectées étant les mêmes on ne regardera pas l'influence du diamètre des argiles sur la capacité de dépôt. Dans le cas des essais (S1, S2, S5, S6, S7, S8), la vitesse imposée est identique, les porosités et les diamètres des grains sont différents. Les valeurs du taux de dépôt pour chaque mécanisme sont illustrées dans les figures 4.7, 4.8, 4.9. Nous remarquons que la porosité et le diamètre des grains ont une importance tout aussi prépondérante dans les trois termes de dépôt (λ_D , λ_I , λ_S). De telle sorte qu'une faible porosité induit un taux de dépôt plus élevé qu'une forte porosité. Pareil, les grains collecteurs fins vont engendrer un dépôt plus important dans le milieu en comparaison à des grains de diamètres plus grands et cela pour les trois mécanismes étudiés.

Dans le cas des essais (S2, S3, S4), les filtres sont composés de diamètres de grains identiques et les vitesses d'injection appliquées sont différentes (Figures 4.10, 4.11, 4.12). Nous remarquons que le taux de dépôt augmente avec l'augmentation de la vitesse pour la diffusion et l'interception directe, à l'inverse, le taux de dépôt par sédimentation diminue pour les augmentations des vitesses. Nous remarquons que le terme de sédimentation est prépondérant pour les faibles porosités et les faibles vitesses d'injection.

La figure 4.13 illustre les résultats du dépôt à l'entrée de la colonne par un modèle de filtration avec une cinétique de premier ordre. Les densités enregistrées par le gammadensimètre permettent d'estimer la concentration immobile expérimentalement (courbes bleues). Le coefficient de dépôt constant λ_0 permet d'estimer la concentration immobile C_{im} à partir du modèle de filtration (courbes rouges).

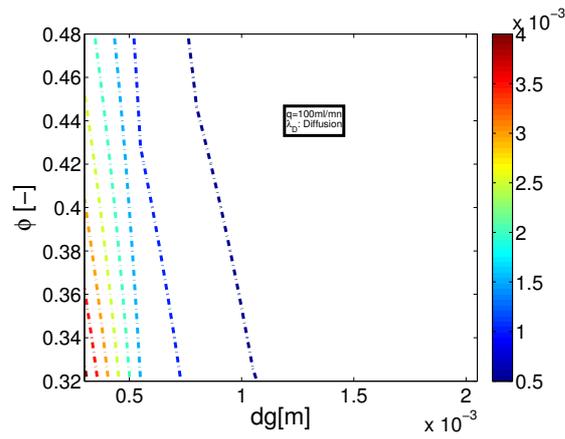


Figure 4.7 – Estimation du taux de dépôt λ_D en fonction de la porosité et du diamètre des grains.

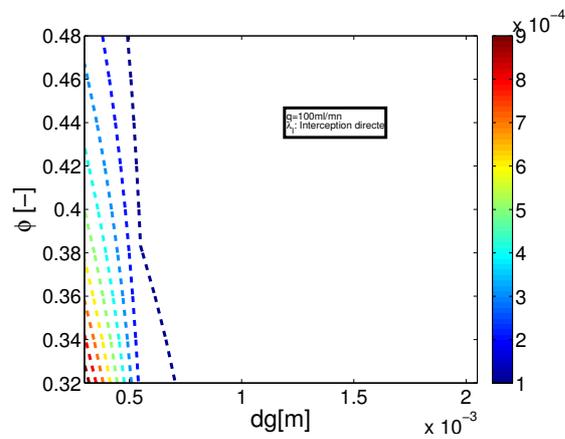


Figure 4.8 – Estimation du taux de dépôt λ_I en fonction de la porosité et du diamètre des grains.

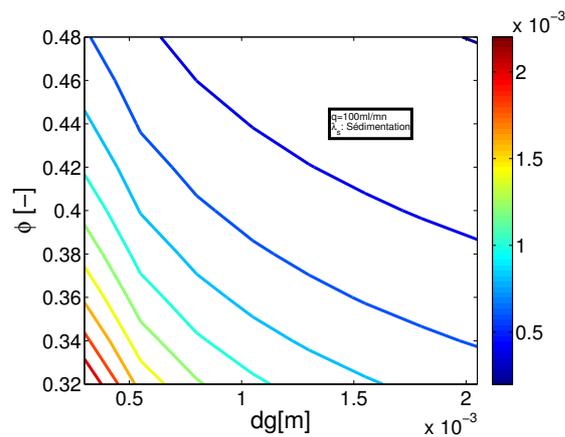


Figure 4.9 – Estimation du taux de dépôt λ_S en fonction de la porosité et du diamètre des grains.

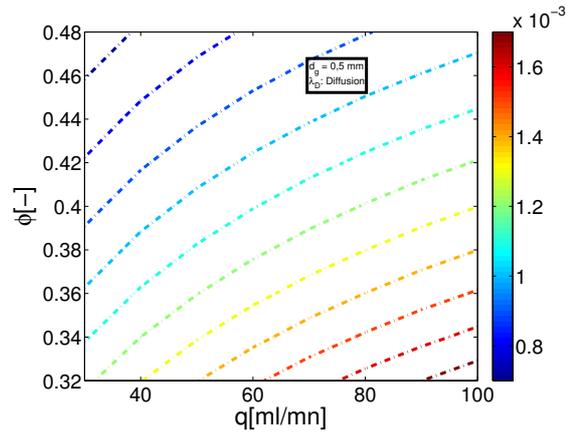


Figure 4.10 – Estimation du taux de dépôt λ_D en fonction de la porosité et de la vitesse.

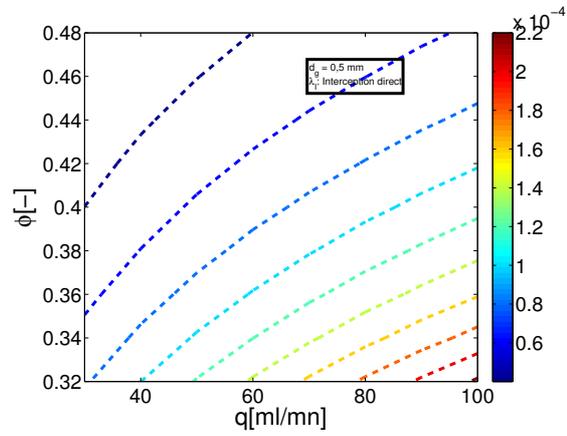


Figure 4.11 – Estimation du taux de dépôt λ_I en fonction de la porosité et de la vitesse.

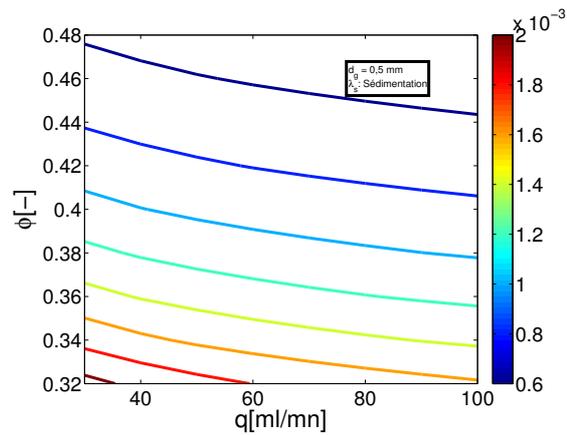


Figure 4.12 – Estimation du taux de dépôt λ_S en fonction de la porosité et de la vitesse.

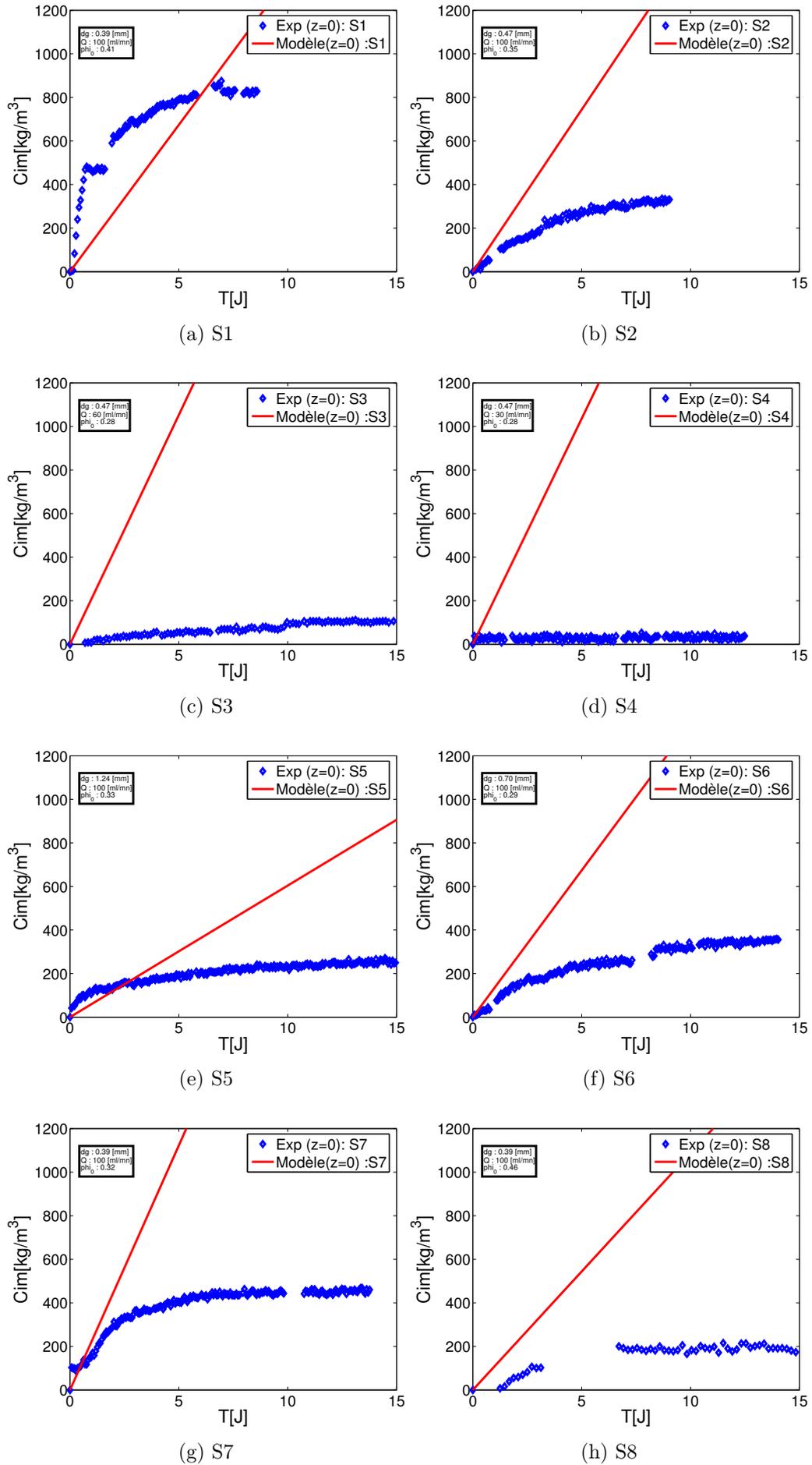


Figure 4.13 – Évolution de la rétention C_{im} dans le temps à l'entrée de la colonne par une cinétique de premier ordre.

Les observations de la forme du dépôt à l'entrée de la colonne dans le cas d'une cinétique de premier ordre permettent d'en extraire les remarques suivantes :

1. Au début des essais et à débit constant 100ml/mn (excepté l'essai S1), les valeurs simulées de la concentration immobile sont tangentes aux valeurs expérimentales. Le coefficient de dépôt λ_0 constant pour chaque essai est représentatif du dépôt au niveau du filtre encore propre. Les dépôts survenus sont bien décrits par le mécanisme d'« *attachement* » des particules dans des sites de rétention encore propre. Néanmoins, dans les simulations des essais S3 et S4 (courbes rouges) dont les débits respectifs sont de 60ml/mn et de 30ml/mn, nous observons une augmentation du taux de particules déposées, liée à une diminution du débit. Ceci n'est pas en accord avec les essais expérimentaux au début de l'injection qui montrent que l'interception des particules diminue avec la diminution du débit d'injection (courbes bleues). Afin d'y remédier, on prend un paramètre a dans la fonction de dépôt $F(C_{im})$ qui sera décrite par la suite. Ce coefficient va permettre de prendre en compte la vitesse d'injection des solutions.
2. Les valeurs des dépôts représentées par la concentration immobile C_{im} sont beaucoup plus importantes à la fin de chaque essai simulé en comparaison aux valeurs expérimentales. Avec une cinétique linéaire, la concentration immobile simulée augmente sans limite, dépassant même la capacité maximale des pores à retenir les particules fines.

Étant donné que dans la cinétique de premier ordre, les sites de rétention sont considérés toujours propre, la simulation de la concentration immobile est sans limite et n'est pas sensible aux changements induits par les particules déjà retenues dans l'espace porale. Il n'y a pas d'effet de saturation des sites comme cela avait été observé dans les essais expérimentaux et par les observations microscopiques. En se basant sur les essais expérimentaux et les hypothèses effectuées dans le chapitre précédent sur la chronologie du dépôt, nous avons dans les premiers instants de la filtration des sites de rétention de surface qui se saturent progressivement par *attachment*, suivi par un dépôt en forme de ponts entre les collecteurs. Cela obstrue les gorges des pores au fur et à mesure, dans ce cas le coefficient $P1$ diminue ($P1 < 1$). Afin de simuler l'histoire du dépôt par *attachment* et ensuite par *straining*, une cinétique du second ordre s'impose, elle considère la saturation progressive des sites jusqu'à atteindre la capacité maximale de ces sites de rétention dans le milieu, déterminée par $C_{im,max}$.

Pour remédier à la première remarque sur l'influence du débit dans le terme de dépôt, nous avons introduit un coefficient a dans la fonction de dépôt. À partir de l'équation cinétique de dépôt 4.42, nous pouvons avoir l'estimation de a pour des milieux encore propres. On prend uniquement $F(C_{im}) = a$ et on détermine le coefficient a en fonction de la vitesse, de tel sorte que a est représenté par :

$$a = \sum_{t=0:4j, \forall(N_{test}, z)} \frac{1}{\lambda_0(N_{test}, z) \cdot C} \cdot \left(\frac{C_{im}(z, t + \Delta t) - C_{im}(z, t)}{\Delta t} \right) \quad (4.47)$$

La figure 4.14 montre la variation de a en fonction de la vitesse d'injection $v[m/s]$ pour les différents essais à l'exception de l'essai S3- $q=60\text{ml/mn}$, pour lequel on appliquera les résultats issus des coefficients de calage afin de valider le modèle proposé. En faisant une hypothèse de linéarité entre les deux variables, on obtient l'équation : $a = 7884 \cdot v - 0,46$ avec un coefficient de corrélation $\hat{\rho}_{av} = 0,7$.

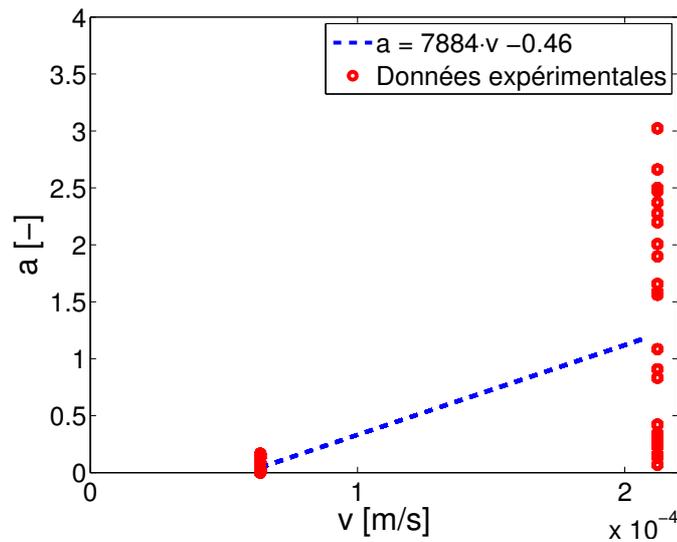


Figure 4.14 – Ajustement du coefficient de dépôt par un coefficient a en fonction du débit d'injection.

En utilisant le coefficient $a(v)$ dans l'évaluation de la concentration immobile et en gardant la fonction de dépôt $F(C_{im}) = a$, les particules fines se déposent davantage pour les vitesses d'injection importantes. Physiquement, on peut relier l'augmentation de la vitesse à l'augmentation de la dispersion des particules dans le milieu. Étant donné que les particules se dispersent plus rapidement pour une grande vitesse, ils parcourent plus rapidement les différents collecteurs et les collisions seront plus efficaces dans des collecteurs encore propres. Cela explique l'importance du taux de dépôt pour les grandes vitesses quasiment au début de l'essai d'injection. La démarche retenue pour la détermination de a est faite à partir des résultats de la cinétique de dépôt $\frac{\partial C_{im}}{\partial t}$ le long de la colonne sur des profils enregistrés au début de l'essai d'injection (maximum 4 jours), dans des milieux poreux propres capables encore de coincer des particules. Il reste à s'interroger sur le rôle de la forme hexagonale des particules fines ainsi que la forme légèrement allongée des collecteurs sur l'efficacité de collision (ces deux paramètres peuvent être intégrés dans l'évaluation du coefficient de filtration).

La figure 4.15 représente les résultats expérimentaux et simulés du dépôt au point d'entrée de la colonne. En faisant un balayage sur toute la colonne par le gammadensimètre, la figure 4.16 représente les résultats de l'évolution des profils de dépôt expérimentaux et simulés durant un essai de filtration. Les résultats des profils de dépôts simulés sont représentés par des lignes continues dans les mêmes moments que les essais expérimentaux qui sont représentés par des losanges. Les résultats issus de la modélisation sont représentés par une concentration immobile C_{im} identifiée par le coefficient de dépôt λ_0 constant durant un essai. Il est fonction du débit d'injection, de la porosité moyenne de la colonne et du rapport $N_R = d_g/d_p$.

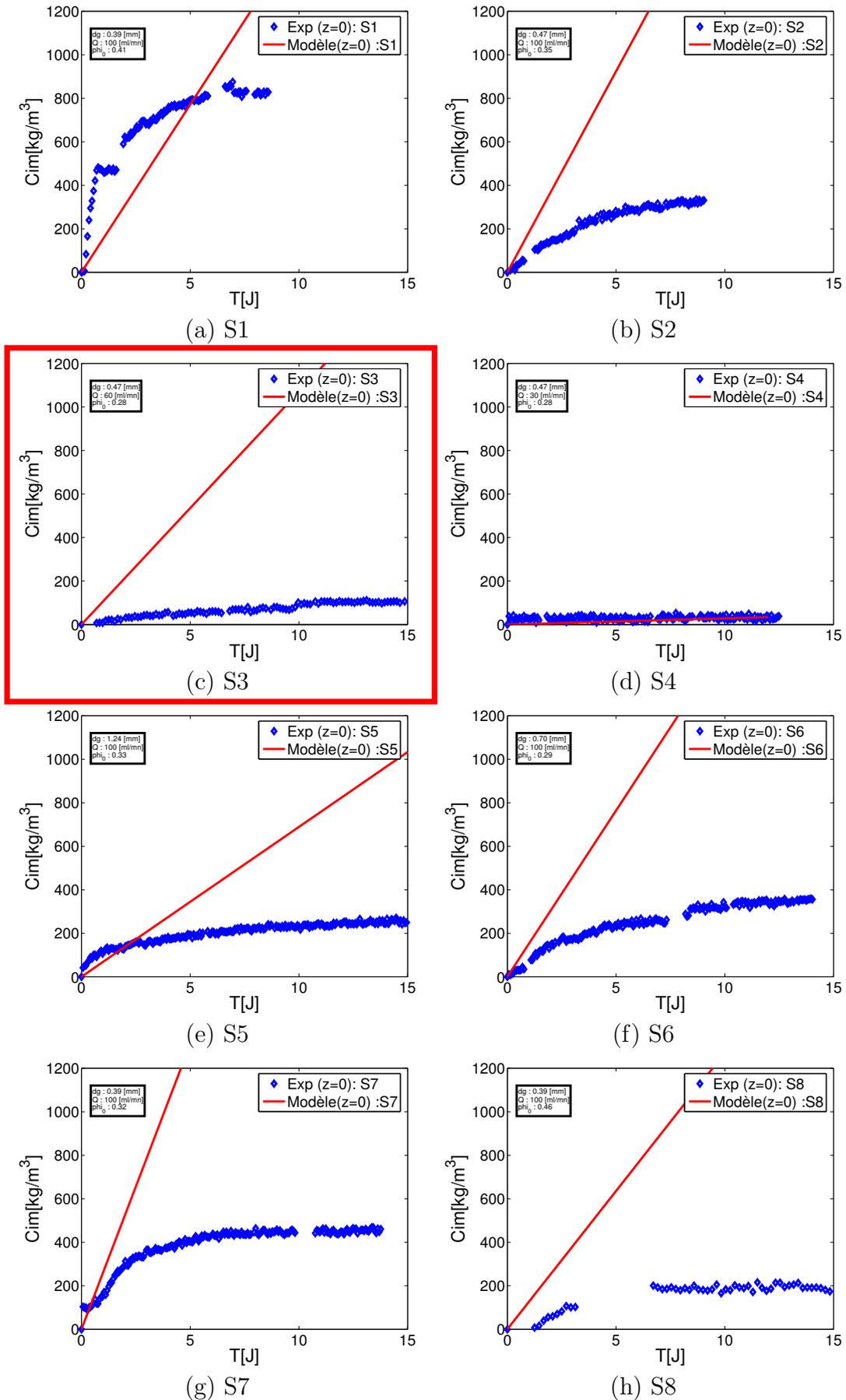


Figure 4.15 – Évolution de la rétention C_{im} dans le temps à l'entrée de la colonne par une cinétique de premier ordre $F(C_{im}) = 1$ en rajoutant le coefficient $a(v)$.

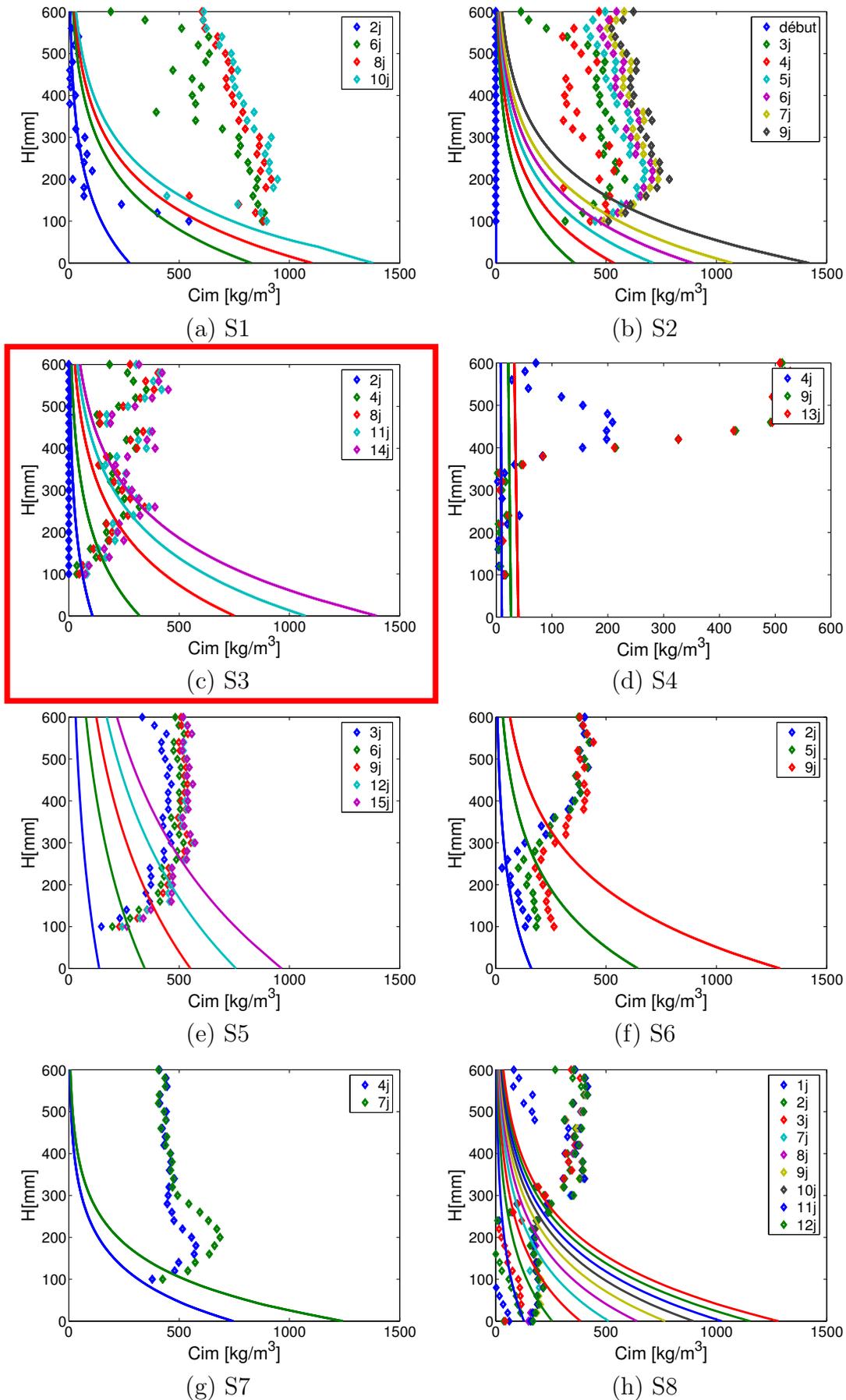


Figure 4.16 – Profils des particules retenues le long de la colonne à différents jours d'injection. Les points correspondent aux mesures expérimentales et les lignes correspondent à la modélisation du dépôt par une cinétique de premier ordre $F(Cim) = 1$.

À partir des résultats du modèle de transport par convection-diffusion avec un terme puits de cinétique de premier ordre, dont $\lambda = \lambda_0 \cdot F(C_{im})$, nous avons $F(C_{im}) = a$, avec a coefficient fonction du débit. Les comparaisons des résultats expérimentaux de l'évolution des profils de dépôt dans toute la colonne sont représentées dans la figure 4.16 et les résultats à l'entrée de la colonne sont représentés dans la figure 4.15. Nous constatons quelques lacunes :

- Les simulations de l'évolution de la concentration immobile dans le temps sont insuffisantes pour reproduire les essais expérimentaux à l'entrée de la colonne (Figure 4.15). Les simulations de l'évolution des profils de rétention des essais à différents jours (Figure 4.16) présentent les mêmes formes de profil de dépôts, à l'exception de l'essai $S4 : q = 30\text{ml/mn}$. Soit, la concentration immobile déterminée par le modèle macroscopique est très importante à l'entrée de la colonne et insuffisante en parcourant le milieu dans la hauteur $H[\text{mm}]$ de la colonne. Ceci est dû au fait que toutes les particules vont s'accumuler en continu à l'entrée de la colonne sans prendre en compte la saturation des sites qui permet de disperser les particules dans les profondeurs du milieu.
- Expérimentalement, l'allure des courbes des profils de rétention à différents enregistrements ne dépendent pas de la distance parcourue dans le milieu avec un front de colmatage, comme cela est relaté dans les revues de [Herzig et Goff \(1972a\)](#); [Bradford et Bettahar \(2006\)](#), où les auteurs décrivent que les faibles concentrations de particules en suspension diminuent progressivement de l'entrée vers la sortie du filtre. En outre, la rétention dans un milieu homogène est plus importante à l'entrée de la colonne et diminue en traversant les couches du milieu. Les profils de rétention expérimentaux observés lors de nos essais de filtration ne suivent pas les courbes de rétention simulées par un dépôt de premier ordre que ce soit à l'entrée ou bien le long de la colonne et cela pour une injection de faible concentration ($C_0 = 0,5\text{g/l}$). Le dépôt se fait d'une manière désordonnée et cela dès les premiers jours de l'essai. Les quantités importantes de dépôt se produisent au début de chaque essai et ensuite progressivement les taux de dépôt diminuent en quantité jusqu'à se stabiliser.

En vue de satisfaire les dernières remarques et de se rapprocher au mieux des profils de rétention des particules (issus des enregistrements de la densité), on se place dans le cas d'une cinétique de dépôt du second ordre.

Résultats de la cinétique du second ordre

D'après les essais expérimentaux de la concentration immobile représentée par les lignes bleues (figures 4.15), on observe après un certain temps que les dépôts des particules C_{im} atteignent des paliers. On suppose que cela se produit une fois que les particules se soient déposées autour des collecteurs et une fois que les ponts entre les collecteurs se soient formés. Donc, une

capacité de rétention maximale est atteinte dans les pores, celle-ci est représentée par la concentration immobile $C_{im,max}$. Dès lors, les particules en suspension se dirigent vers d'autres sites de rétention.

Comprendre le phénomène de transport-dépôt et arriver à le modéliser dans chaque point de la colonne constitue toute la difficulté de l'étude. La capacité maximale qu'un milieu a de recevoir et de piéger les particules dépend : (i) des sites de rétention accessibles aux particules piloté par la géométrie des pores, (ii) de l'espace poral initial engendré par la granulométrie des filtres, et (iii) les forces physico-chimiques et hydrauliques appliquées à l'échelle du pore. Dans un dépôt du second ordre, la fonction de rétention peut prendre différentes formes (Tableau 4.1). Nous avons choisi une fonction de rétention qui dépend de la concentration des particules déjà déposées C_{im} et de la capacité maximale $C_{im,max}$ de rétention du milieu poreux observée dans les essais, elle sera représentée par cette formulation :

$$F(C_{im}) = a \cdot \left(1 - \frac{C_{im}}{C_{im,max}}\right)^b \quad (4.48)$$

où, a et b sont des constantes à déterminer par calage. Le terme a est fonction du débit, il a été défini plus haut. Dans un début, nous prendrons le coefficient $b = 1$. Le terme C_{im} représente la concentration immobile des particules fines dans le milieu poreux pour lesquels les sites de rétention commencent à se saturer jusqu'à atteindre la capacité maximale $C_{im,max}$ du milieu. A la fin des essais nous avons remarqué que cette capacité maximale n'est pas régulière dans toute une colonne. Les résultats trouvés ne correspondent pas forcément aux résultats des modèles dans la littérature, dans lesquels il existe un front de rétention avançant d'une manière constante dans les différentes couches d'un milieu homogène, de telle manière qu'une fois que le dépôt ait atteint sa capacité limite dans une couche, les particules avancent dans les couches suivantes du milieu afin de saturer d'autres sites de rétention.

Dans le but de voir l'influence des conditions initiales sur la capacité maximale des sites de rétention, une étude paramétrique a été réalisée. La figure 4.17 en forme de matrice présente la variation de $C_{im,max}$ de tous les essais par rapport à différentes conditions expérimentales (*e.g.* la porosité initiale ϕ_0 , le diamètre des collecteurs d_g et le débit q). On constate que la variable qui explique le mieux la valeur de $C_{im,max}$ est la porosité initiale avec un coefficient de corrélation $\hat{\rho}_{C_{im,max} \phi_0} = 0,81$. En contre partie, la corrélation entre $C_{im,max}$ et le débit $\hat{\rho}_{C_{im,max} q} = 0,6$ n'est pas aussi prépondérante qu'au début de l'essai pour des collecteurs propres. Le choix initial des gammes des diamètres des grains d_g n'est pas assez étalé pour obtenir l'influence des collecteurs sur la capacité de dépôt. Ainsi, la porosité initiale est un paramètre dominant sur l'efficacité maximale de dépôt, cet espace poral accessible aux particules fines conditionne la concentration immobile maximale des particules dans chaque point à l'intérieur de la colonne.

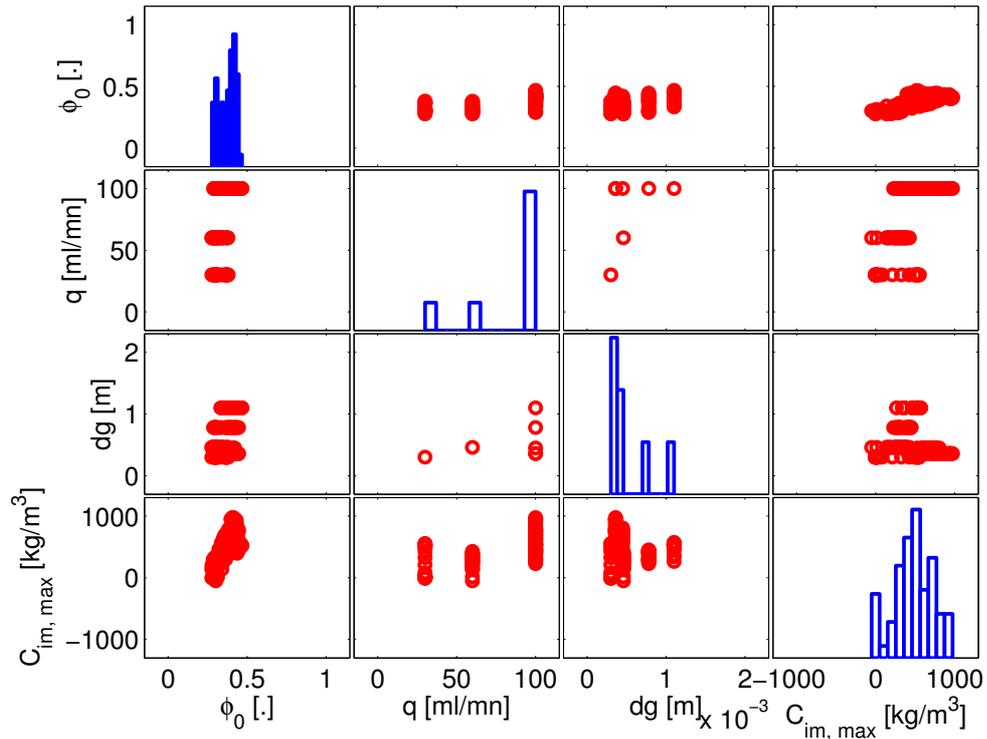


Figure 4.17 – Corrélation entre le taux de dépôt et les propriétés des essais : porosité, dg et débit.

La figure 4.18 représente les concentrations immobiles maximales enregistrées dans toute la colonne en fonction de la porosité initiale de chaque point de la colonne. Tous les essais sont représentés excepté l'essai S3 qui doit nous servir pour valider le modèle. En faisant une hypothèse de linéarité entre ϕ_0 et $C_{im,max}$, on obtient l'équation de la concentration maximale en fonction de la porosité initiale tel que, $C_{im,max} = a1 \cdot \phi_0 - b1$; avec un coefficient de corrélation $\hat{\rho}_{C_{im,max} \phi_0} = 0,7$ avec : $a1 = 3792 \pm 590$; $b1 = 910 \pm 224$. Les intervalles de confiance représentent l'intervalle dans lequel on a 95% de chance pour trouver des sites de rétention saturés. Pour une même porosité, l'écart de $C_{im,max}$ trouvé est important du fait d'un dépôt assez aléatoire dans le milieu.

Notre approche a été de comprendre l'influence de chaque paramètre sur les quantités de dépôts. L'évolution des concentrations immobiles dans le milieu est pilotée par une concentration maximale que les sites de rétention peuvent accueillir. Cette concentration immobile maximale dépend de la porosité initiale qui constitue les pores accessibles aux particules. Une porosité importante est donc une condition favorable pour le dépôt. Par ailleurs, des porosités importantes engendrent des vitesses locales des pores $u = v/\phi_0$ plus petites. À partir de cela on estime que pour des vitesses locales petites, le temps de résidence des particules fines dans les pores augmente, cela va influencer les interactions entre les collecteurs et les particules fines et

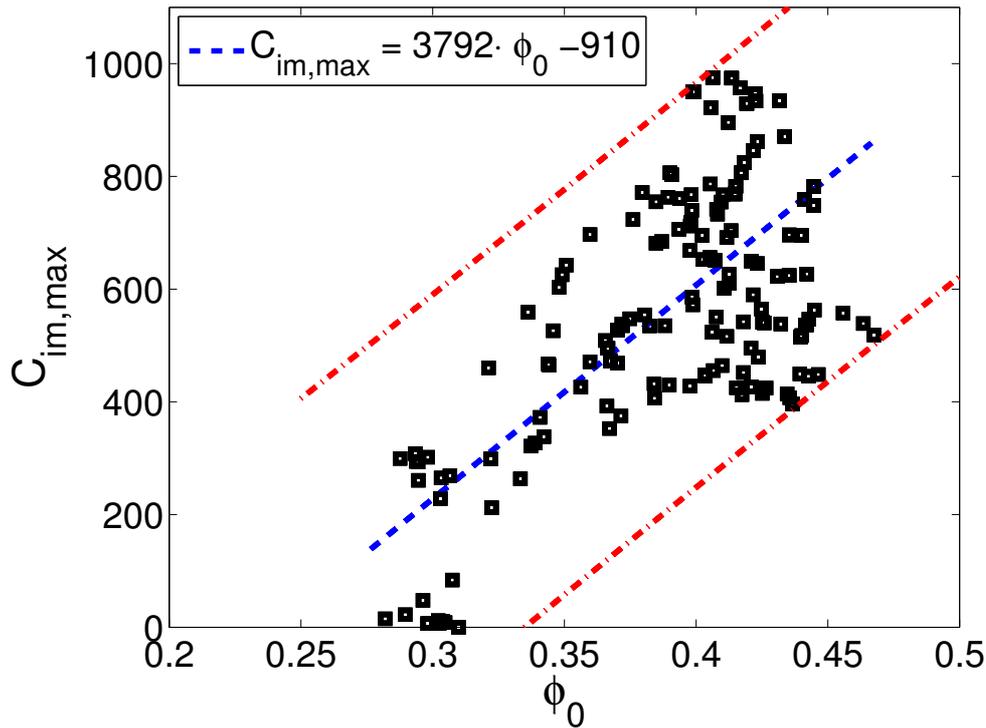


Figure 4.18 – Concentration immobile maximale en fonction de la porosité initiale.

va faire de sorte que les particules vont se déposer davantage. Étant donné que les porosités sont distribuées d’une manière différente dans toute la colonne, les quantités de particules déposées vont suivre cette variation d’espace poral disponible.

En utilisant une cinétique de dépôt du second ordre avec une fonction de dépôt qui dépend de la porosité initiale des milieux poreux et des conditions hydrauliques imposées (équation 4.48), on obtient dans les figures 4.19 l’évolution des profils de concentrations immobiles simulées par Comsol multiphysics en lignes continues et les profils de la concentration immobiles issus des résultats expérimentaux représentés en points. L’essai S3 pour lequel on applique le modèle en aveugle est encadré en rouge.

Dans les figures 4.19, l’évolution des profils de taux de dépôts expérimentaux est plus importante que l’évolution des profils des taux de dépôt estimés à partir du modèle de filtration. On remarque que les formes de profils correspondent aux essais expérimentaux (à l’exception de S8), en revanche les quantités de particules déposées sont insuffisantes.

À partir des porosités et des concentration immobiles C_{im} , nous pouvons calculer l’évolution de la perméabilité en utilisant le modèle de Kozeny-Carman. En se basant sur les résultats de l’évolution de la perméabilité du chapitre précédent, nous avons considéré qu’une partie des particules se déposait autour des collecteurs (faisant augmenter le rayon des collecteurs) et que l’autre partie se déposait dans le milieu formant des ponts entre les collecteurs. L’augmentation

de la tortuosité en fonction de l'évolution de la porosité du milieu est prise en compte dans l'évaluation des profils de perméabilité (Figure 4.20). La perméabilité simulée à partir du modèle est représentée en courbes rouges, elle est déterminée en utilisant une perméabilité équivalente des différentes couches du milieu. La perméabilité expérimentale du milieu est calculée par la loi de Darcy, elle est représentée en courbes bleues.

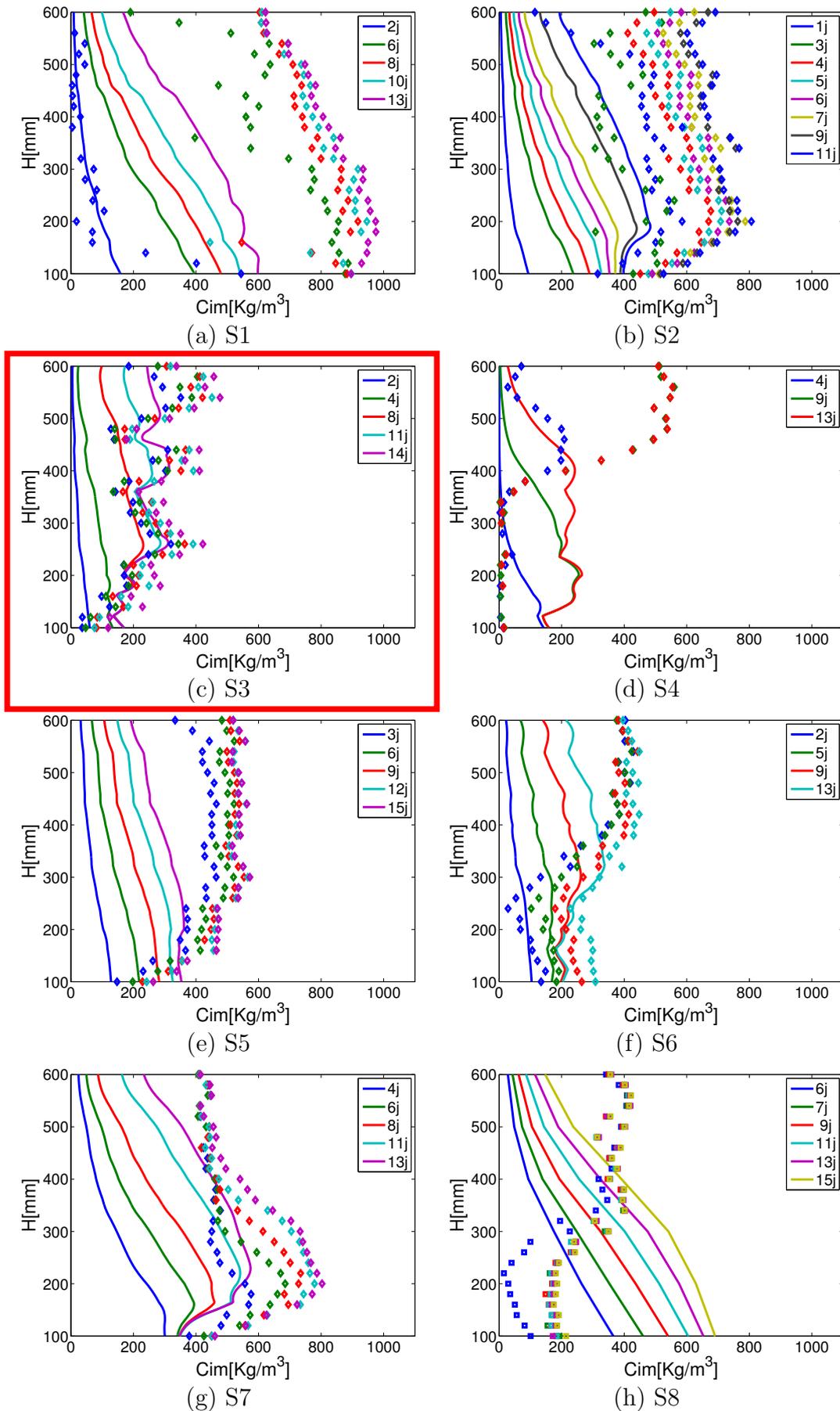


Figure 4.19 – Évolution des profils de particules retenues le long de la colonne à différents jours d'injection. Les points correspondent aux mesures expérimentales et les lignes correspondent à la modélisation du dépôt par une cinétique du second ordre.

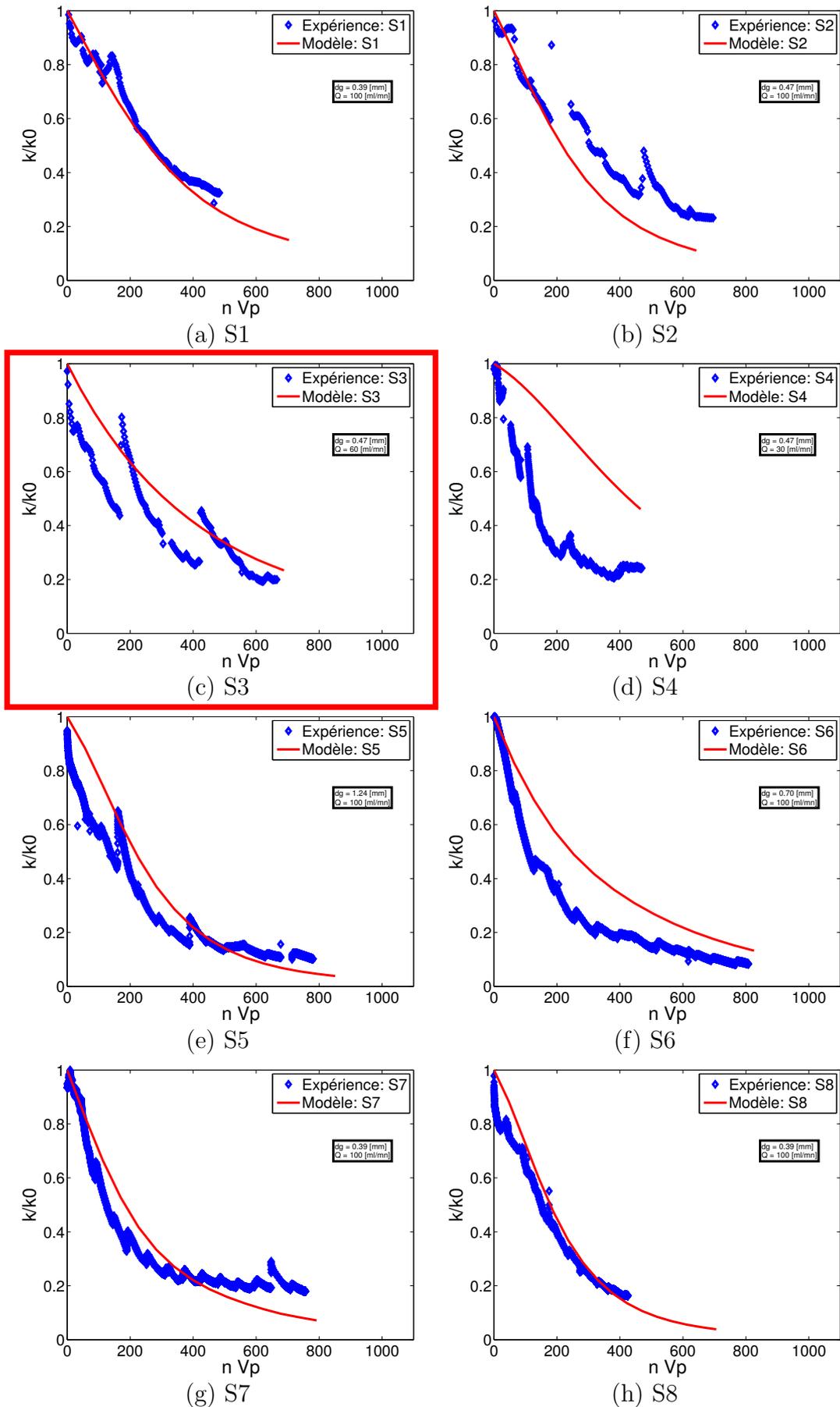


Figure 4.20 – Évolution de la perméabilité globale de la colonne par les essais expérimentaux en courbes bleues et par les simulations du modèle de filtration avec un terme de second ordre.

L'évolution des profils de concentrations immobiles par l'accumulation des particules dans les pores se répercutent sur les estimations des perméabilités (Figures 4.20). Le nombre de particules fines immobiles calculé par la concentration immobile est pris en compte dans la détermination de la surface spécifique et les particules déposées affectent la porosité dans les pores. La chute de perméabilité simulée pour l'essai S2 est plus importante que la chute de perméabilité expérimentales calculée par la loi de Darcy. L'allure des perméabilités simulés pour les essais S1, S7 et S8 sont en bon accord avec l'expérimental. Or, les simulations de la chute de perméabilité pour les essais S5 et S6 pour un même débit 100ml/mn se rapprochent mais restent insuffisantes. Concernant les essais pour de faibles vitesses, les simulations de l'évolution de la perméabilité sont insuffisantes, cela est dû au taux de dépôt des particules qui n'est pas encore bien représenté.

Rappelons que le modèle de filtration se base sur une cinétique de second ordre dont le coefficient de dépôt est estimé par l'efficacité du collecteur à l'échelle du pore. Les écarts de dépôt signifient que les mécanismes pris en compte pour le calcul de λ_0 sont insuffisants et que l'efficacité des collisions α est inférieure à 1. Étant donné que nous sommes dans le cas d'un dépôt défavorable par les forces électrostatiques, seuls les blocages directes par interception directe ou bien les blocages dans des pores étroits dus à des changements dans la géométrie des pores peuvent justifier ces taux de dépôts élevés estimés expérimentalement. Dans la littérature, les expériences menés par [Auset et Keller \(2006\)](#) dans des micromodèles transparents montrent que la rugosité de surface des collecteurs a un effet significatif sur les interactions collecteur-particules en suspension, cela est dû probablement à l'effet de la rugosité du grain sur l'hydrodynamique modifiant ainsi les lignes d'écoulement. En s'appuyant sur ces résultats et afin d'améliorer notre modèle, une hypothèse est émise sur l'effet de la rugosité de surface des collecteurs sur la prédiction du transport de colloïdes dans les milieux poreux saturés. Certes, la texture rugueuse des sables augmente l'efficacité des collisions des particules par piégeage dans les aspérités de la surface. Ainsi, on introduit un coefficient ψ dans l'estimation du coefficient d'efficacité du filtre. On prend un coefficient des aspérités de la surface constant $\psi=3$ dans le terme de l'interception direct des particules, les résultats des profils de dépôt sont présentés dans la figure 4.21 et les évolutions de la perméabilité globale sont représentées dans la figure 4.22. Par ailleurs, nous ne prenons pas en compte l'irrégularité de la forme des grains de sable qui contribue à modifier la géométrie locale des pores, ce qui pourrait aider à comprendre l'irrégularité des dépôts dans les différentes couches par straining.

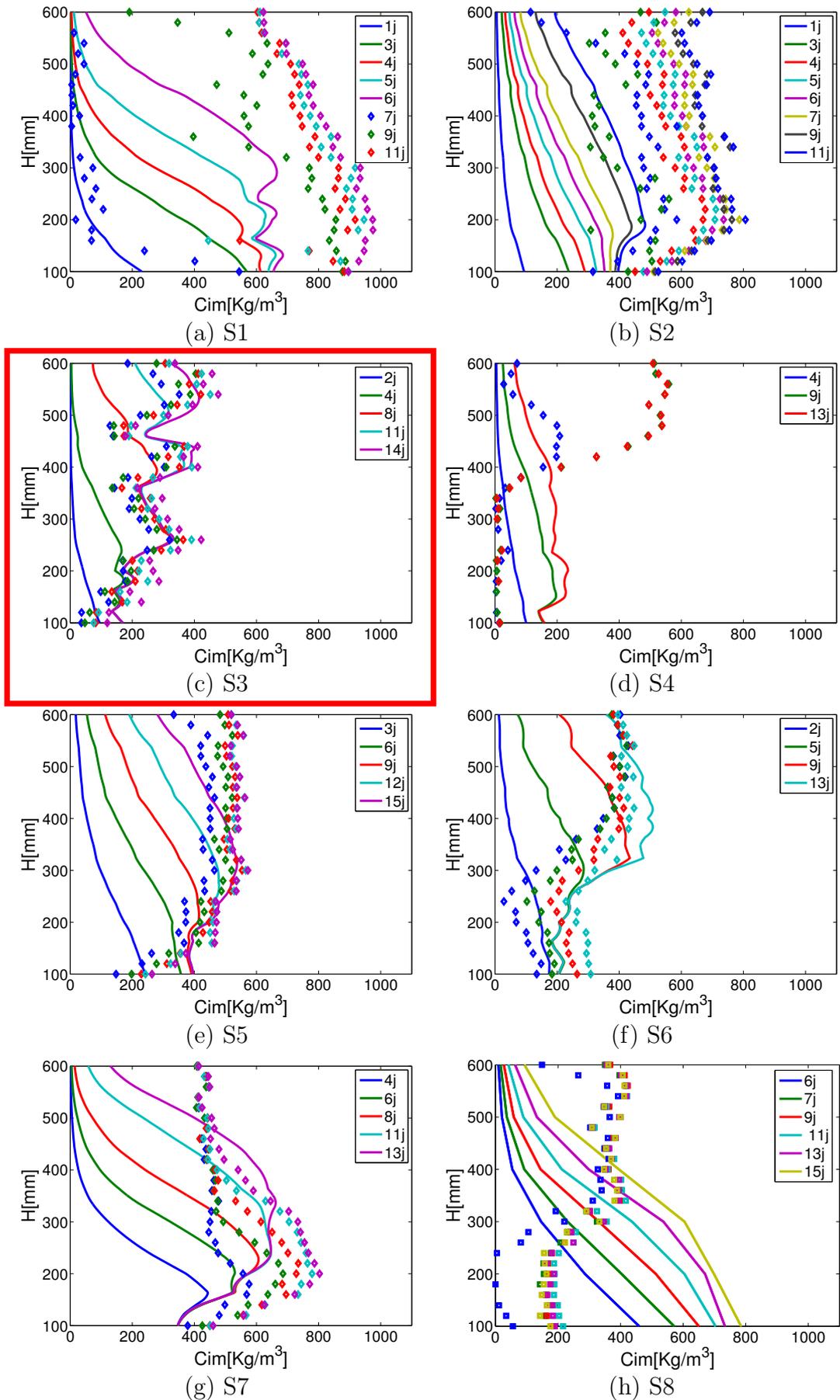


Figure 4.21 – Évolution des profils de dépôt à différents moment de l'injection avec l'introduction d'un coefficient de rugosité des sables.

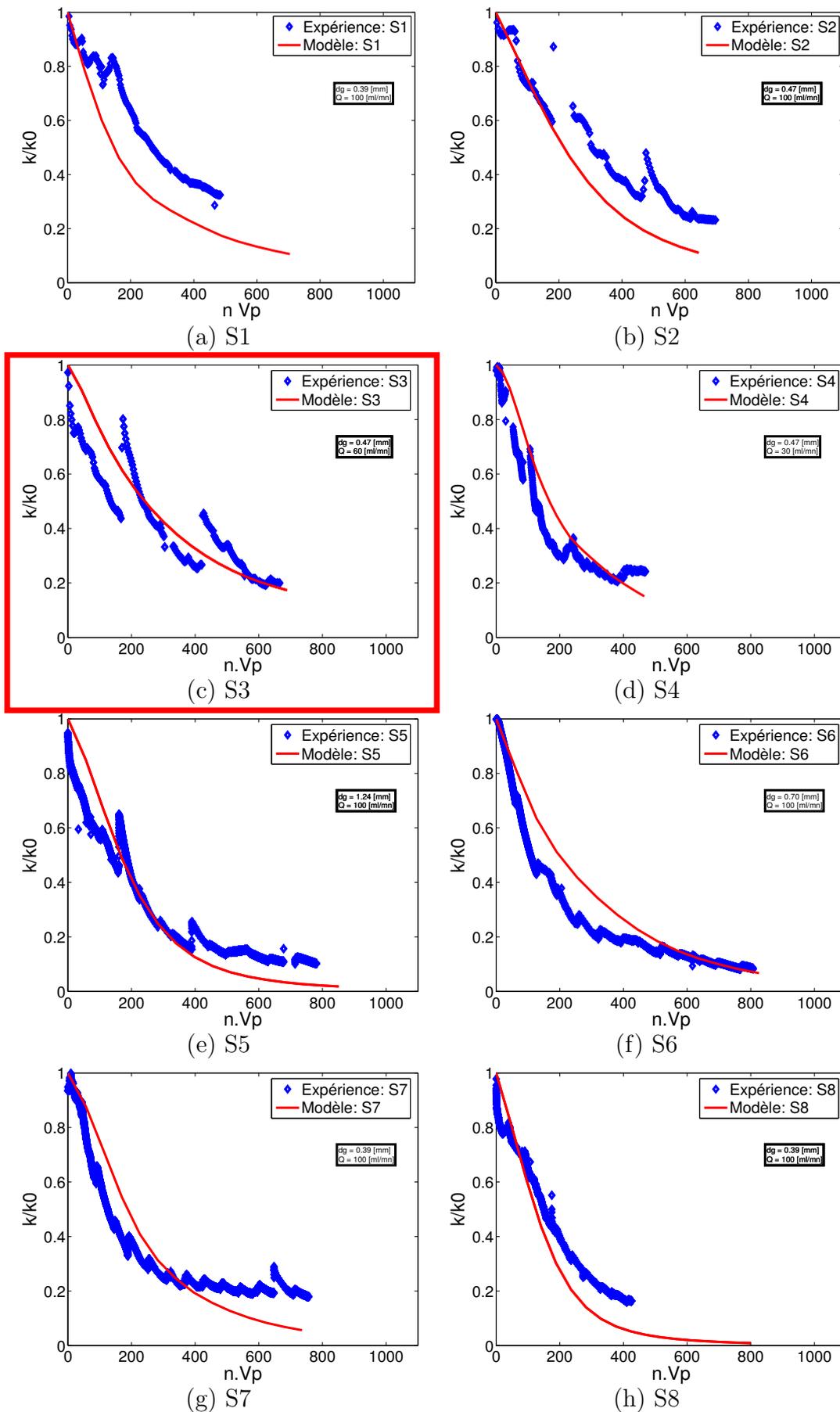


Figure 4.22 – Évolution de la perméabilité globale de la colonne par les essais expérimentaux en courbes bleues et par les simulations du modèle de filtration en introduisant un coefficient de rugosité des sables.

Les résultats de la figure 4.21 des profils de la concentration immobile simulés ne correspondent pas exactement à celles des profils mesurés. La tendance est la même mais la dispersion des particules dans le milieu reste insuffisante. Par ailleurs, dans notre modèle actuel nous avons pris dans l'équation 4.46 une valeur du coefficient de dispersion longitudinal fonction du diamètre des grains. Afin de réussir à simuler les profils de rétention, nous allons augmenter le coefficient de dispersion longitudinal dans le but d'augmenter le transport dans le milieu. Pour chaque essai, le coefficient est pris égale à la hauteur de la colonne traversée. La figure 4.23 présente les résultats des profils de dépôt ainsi obtenus.

Nous constatons que le modèle est capable d'approcher les profils de dépôt sur toute la colonne. L'essai S5 pour les gros graviers est très bien simulé par le modèle et principalement dans le dernier profil. De même pour l'essai S3 pour un débit de 60ml/mn qui est l'essai choisi pour valider le modèle. Les courbes de l'évolution du rapport de perméabilité sont représentées dans la figure 4.24, nous trouvons la même tendance pour pratiquement tous les essais, excepté S1 et S2. L'utilisation du modèle de Kozeny-Carman pour l'évolution de la perméabilité est adéquat dans le cas d'un milieu complexe hétérogène.

Cependant, les profils de rétention simulés par le modèle développé durant un essai ne correspondent pas parfaitement aux profils à chaque instant de l'essai. En considérant la relation $C_{im,max} = a1 \cdot \phi_0 - b1$, issue de la figure 4.18, nous avons maintenu une pente constante $a1=3792$ et nous avons fait varier $b1 = 910 \pm 224$. En utilisant les extrema de $b1$ on peut obtenir des intervalles de variation de dépôt de chaque profil. Nous présentons dans la figure 4.25 les intervalles de variations de dépôt du dernier profil simulé, et le dernier profil mesurée. Nous remarquons que les intervalles calculées contiennent majoritairement les mesures de la concentration immobile, sachant que les extrema représentent les intervalles dans lesquels on a 95% de trouver des sites de rétention saturés. Les valeurs simulées de l'essai S8 sont largement supérieures aux valeurs mesurées expérimentalement. Cette essai se distingue par une grande porosité initiale, dont les sites de rétention en tous points de la colonne ne sont pas encore saturés. Des fissures dans le milieu granulaire ont été constatées durant l'essai qui sont à l'origine de ce faible dépôt.

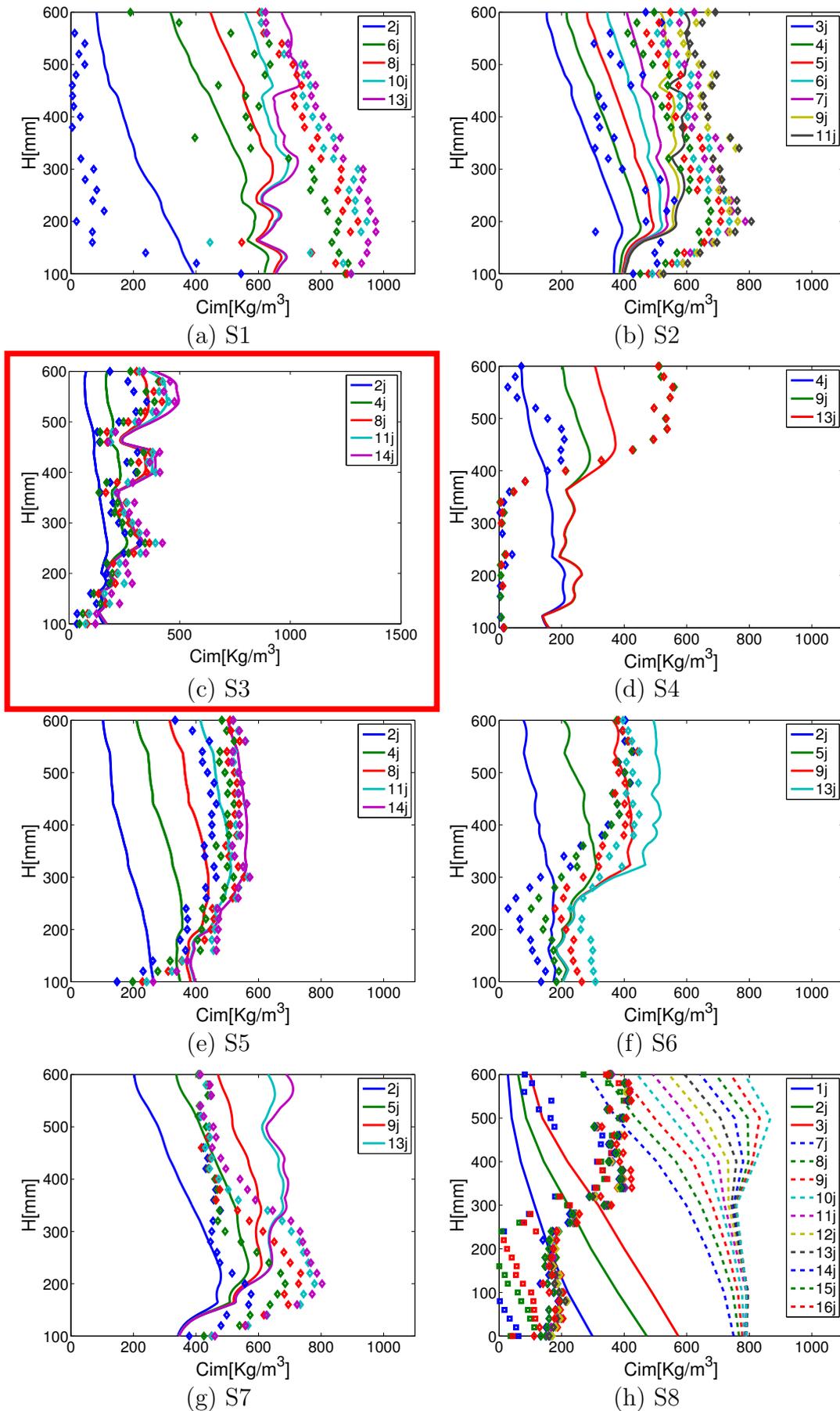


Figure 4.23 – Évolution des profils de dépôt à différents moment de l'injection avec l'introduction d'un coefficient de rugosité des sables et l'augmentation du coefficient de dispersion.

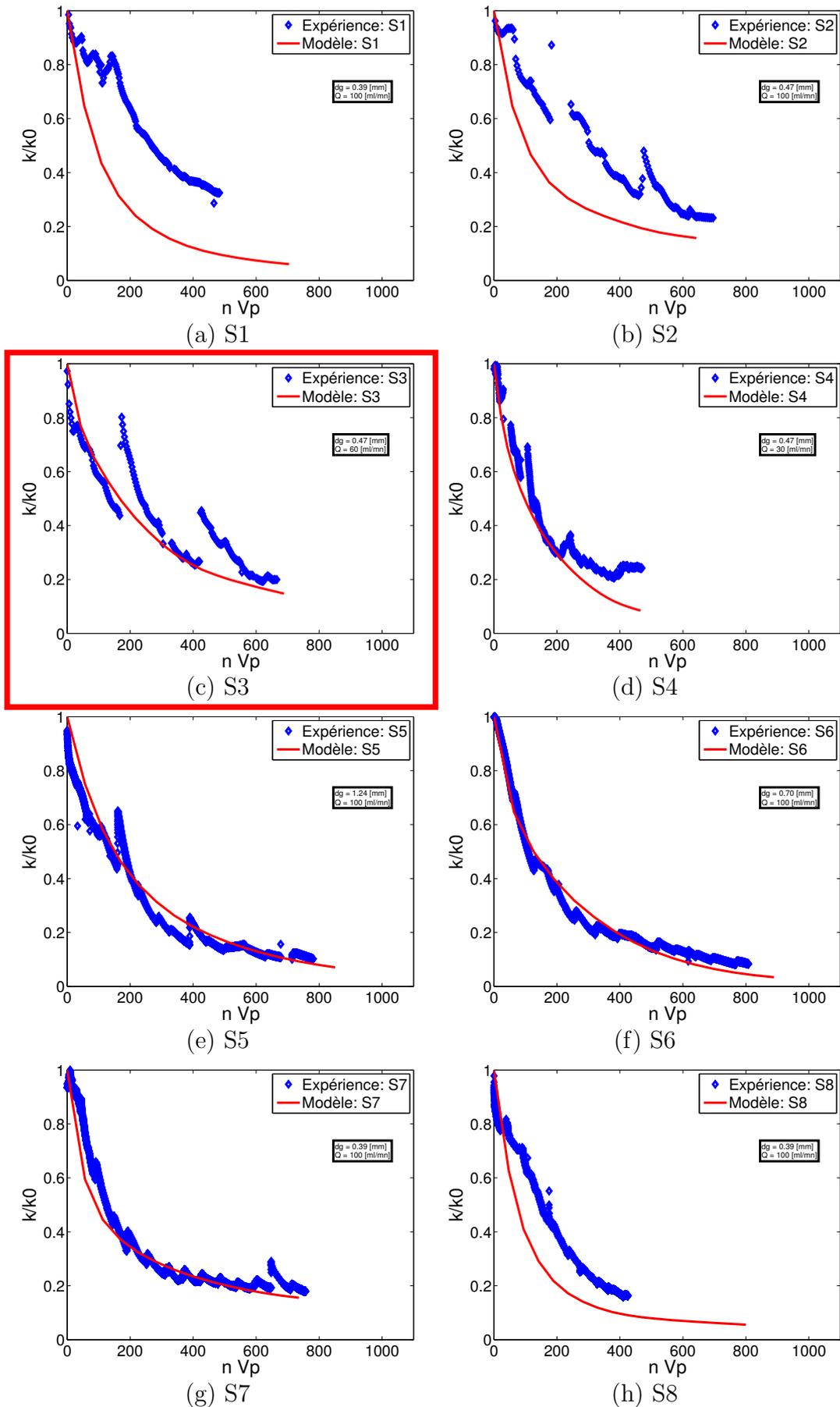


Figure 4.24 – Évolution de la perméabilité en introduisant un coefficient de rugosité des sables et une augmentation de la dispersion longitudinal des particules fines.

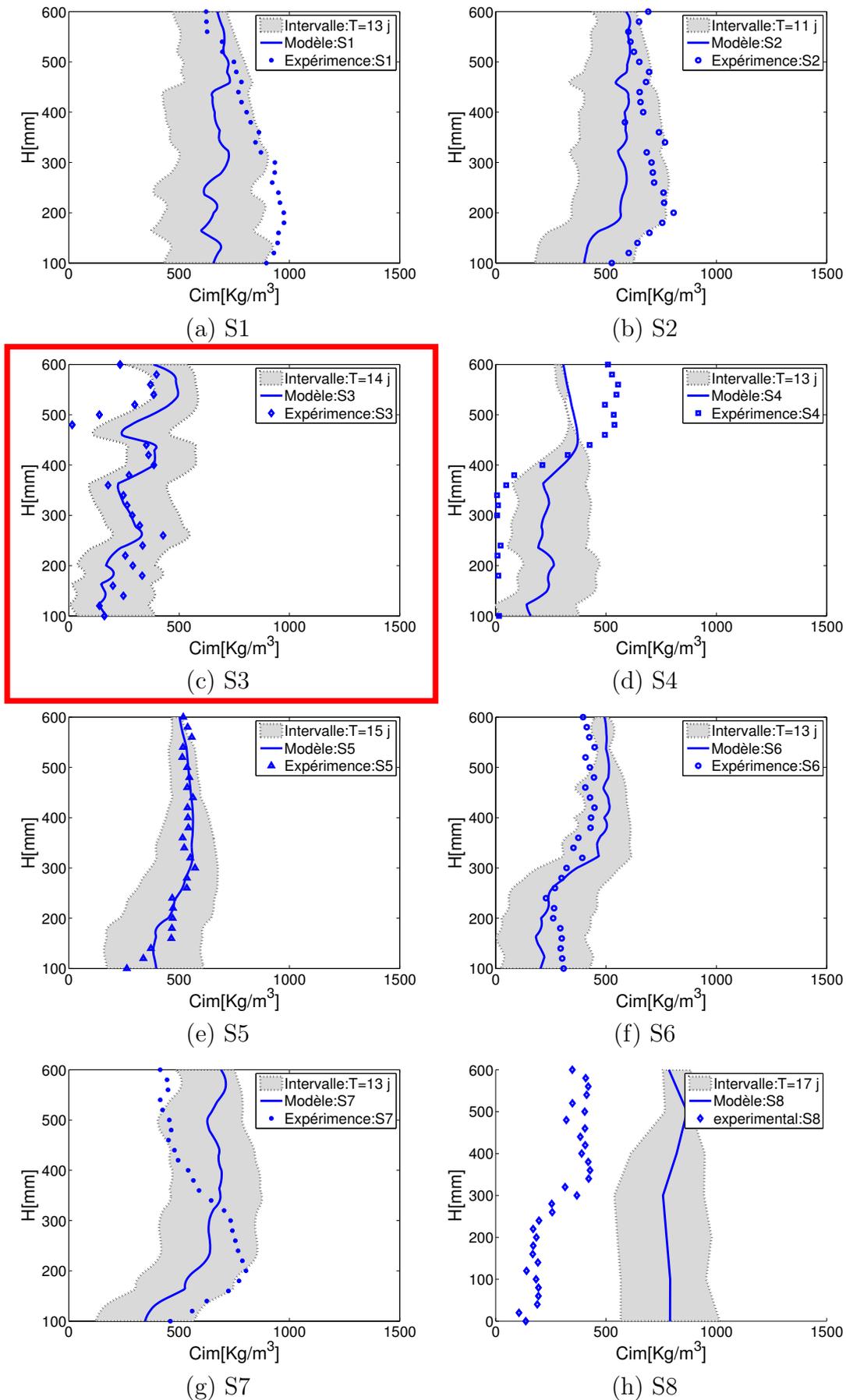


Figure 4.25 – Comparaison du dernier profil de la concentration immobile entre l'expérience et le modèle dans un intervalle de confiance (rugosité, dispersion plus importante sont prises en compte).

À partir de la figure 4.22, les résultats des simulations de l'évolution de la perméabilité se superposent parfaitement avec les résultats expérimentaux pour l'essai de validation du modèle S3 pour un débit de 60ml/mn (Figure 4.22c). Pareil pour l'essai S4 pour un autre débit de 30ml/mn. Cependant pour les essais S1, S7, S8 pour le même débit 100ml/mn mais des milieux poreux constitués de particules fines différents, la prédiction de la perméabilité est un peu surestimé.

4.5.3 Bilan du modèle développé

Les résultats des essais expérimentaux ont été comparé aux résultats de la simulation et un essai à l'aveugle S3 nous a permis de valider le modèle. Dans ce modèle macroscopique de convection dispersion avec un terme puits, nous avons réussi à introduire des paramètres mesurés et observés (présentés dans le chapitre précédent) et qui sont :

- Le débit d'injection dans le terme a ;
- La porosité initiale de chaque point, déduite des enregistrements du gammadensimètre ;
- Un coefficient de rugosité ;
- Un coefficient de dispersion longitudinal fonction de la hauteur de colonne ;
- La chronologie du dépôt dans l'évaluation de la perméabilité par Kozeny-Carman ;
- Les diamètres des collecteurs et des particules fines introduit dans le terme de l'efficacité du collecteur ;
- Mettre en place une fonction de filtration qui dépend de la concentration maximale dans le milieu.

Cette approche a pour but de comprendre le dépôt de particules fines non sphériques dans un milieu polydisperse et hétérogène, en utilisant un modèle développé avec un maximum de propriétés du milieu et un minimum de coefficients de calage. Certains coefficients restent encore à développer notamment le coefficient de rugosité des sables, la géométrie des pores afin d'avoir un modèle robuste en mesure de prédire l'évolution des perméabilités dans les milieux poreux colmatés.

Afin de comparer les résultats des modèles pour les différents essais, nous avons fait une analyse de sensibilité de chaque paramètre.

4.5.4 Analyse de sensibilité des résultats

Dans le modèle développé, pour une même condition de filtration ($q=100$ ml/mn), nous avons une différence dans le comportement notamment la chute de perméabilité pour des porosités initiales ϕ_0 et des diamètres dg différents. En maintenant le dg constant et en variant la porosité, on remarque que cette porosité ϕ_0 qui se traduit par le rapport de volume des vides

disponible initialement sur le volume totale, influence le dépôt, cela avait déjà été mentionné plus haut. Plus la porosité ϕ_0 est grande, plus le dépôt est important, et donc la chute de perméabilité globale est plus importante.

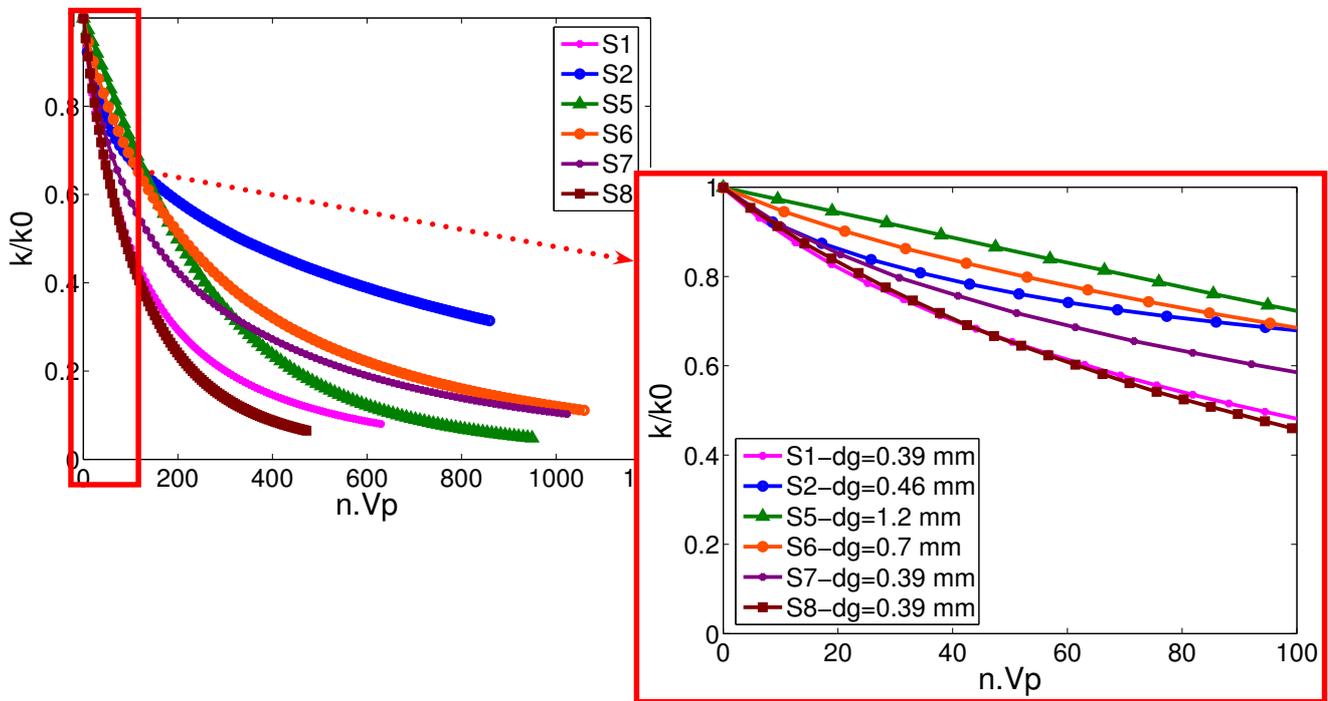


Figure 4.26 – Évolution de la perméabilité dans les différentes conditions expérimentales.

La figure 4.26, montre la simulation de tous les essais en utilisant le modèle de transport-dépôt avec le terme puits. Pour un même débit et différentes granulométries et porosités, nous remarquons qu’au début de l’essai et jusqu’à un nombre de volume des pores de 100, la chute de perméabilité est plus importante pour les milieux fins (S1, S7, S8), dont le diamètre représentatif est $dg = 0,39\text{mm}$. Nous obtenons une chute croissante avec la diminution des diamètres des grains de chaque filtre. L’essai S5, ayant un diamètre des grains plus important, voit sa chute de perméabilité plus faible que les essais S6 et S2. Cela se traduit encore une fois par le dépôt qui se forme autour des grains et qui met plus de temps dans les granulométries de filtres importantes.

Concernant l’influence du diamètre des grains dg , pour une même porosité initiale constante $\phi_0 = 0,4$, la figure 4.27 nous donne les résultats de la chute de perméabilité. On constate qu’un diamètre des grains important va engendrer un dépôt moins important au début de l’essai et donc une chute de perméabilité plus faible pour les grosses particules. Cette constatation est en bon accord avec les recherches réalisées par [Alem et al. \(2009\)](#), en injectant des particules d’argile dans des colonnes constituées de sables de différentes granulométries, pour une injection constante de $24Vp$, les chutes de perméabilités sont plus rapides et plus accentuées dans les

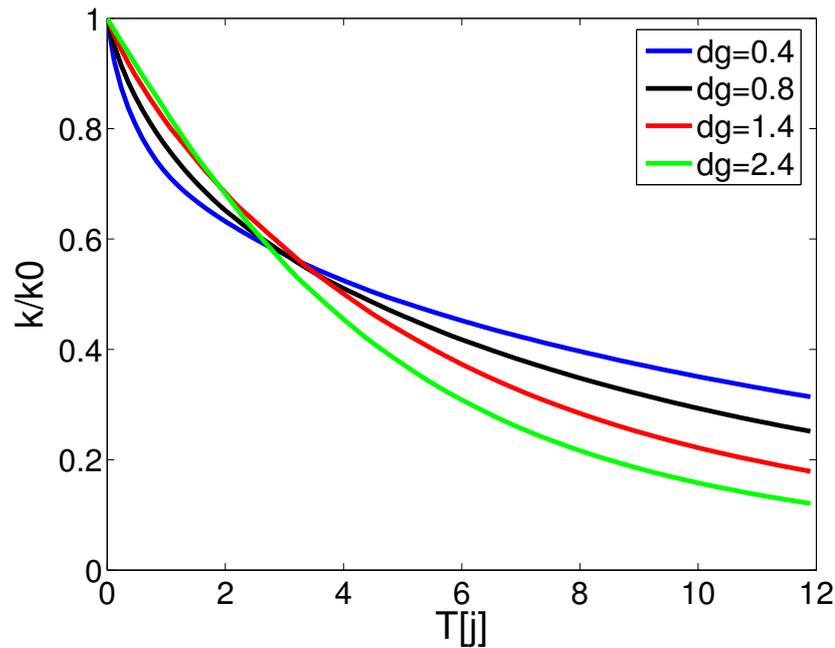


Figure 4.27 – Résultats du modèle pour différents diamètres de sables, dans les mêmes conditions d'essais.

milieux composés de sables fins. Cette constatation a aussi été démontrée par [Porubcan et Xu \(2011\)](#) dans les résultats de transport des particules en latex dans des milieux poreux hétérogènes par des mixtures de différentes tailles de sables. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la fraction des particules fines de sable faisait augmenter le blocage des particules de latex, pour des essais de très courtes durées ($10Vp$). Cela dit dans le temps, l'évolution de la chute globale de la perméabilité est plus accentuée dans le cas de milieux poreux composés de gros diamètres. On explique cela par la présence de sites de surface plus importants à combler dans le cas de collecteurs importants. Ceci se traduit par une chute de perméabilité assez faible au départ pour les grosses particules de sables et ensuite au fur et à mesure que les sites de surfaces se remplissent, le dépôt par straining sera plus important et induira une chute de perméabilité à la fin assez importante. Étant donné que dans les filtres grossiers, les sites de rétention ne se saturent pas complètement dès le départ de l'essai, ils peuvent fonctionner davantage dans la durée et donc emmagasiner des quantités plus importantes de particules fines, ce qui retarde le colmatage totale des filtres et permet un bon fonctionnement hydrauliques de certaines catégories de filtres.

4.6 Conclusion

A priori, dans un milieu poreux constitué de particules sphériques et d'une porosité homogène sur toute la colonne, le dépôt maximale qu'un milieu pourrait intercepter sera homogène (dépôt homogène dans tout le milieu). Les sites de rétention se satureront progressivement du point d'injection vers la tête de la colonne avec un front de rétention.

Dans cette dernière partie, nous avons exploité les données expérimentales de transport et de dépôt des particules argileuses dans un milieu poreux granulaire et hétérogène en porosité afin de proposer un modèle macroscopique de filtration. Le modèle proposé se base sur des modèles de convection-dispersion avec un terme puits qui détermine le dépôt occasionné dans le milieu. Ce terme a d'abord été décrit par une cinétique de dépôt de premier ordre en fonction uniquement des collisions capables de se produire dans un milieu propre. Cela a permis de voir l'incapacité d'un tel modèle à reproduire les résultats expérimentaux. La capacité de rétention du milieu poreux représentée par le paramètre $C_{im,max}$ s'impose dans ce cas et une cinétique du second ordre a permis de prendre en compte les particules déjà déposées dans les sites de rétention. La concentration immobile maximale a été déterminée en se basant sur les résultats expérimentaux. Nous avons mis en avant la dépendance de la saturation des sites de rétention avec la porosité initiale du milieu capable de piéger les particules en suspension. Par ailleurs, dans notre modèle un faible débit est apparu comme un paramètre qui ne favorise pas le dépôt dans toute la colonne, nous avons introduit un coefficient capable de prendre en compte les débits d'injections dans le milieu.

Nous avons essayé de caler le moins de paramètre possible afin d'avoir un modèle qui pourrait s'appliquer à des essais avec différentes conditions expérimentales (*e.g.* concentrations, débits, porosités, taille des grains et particules colloïdales). Dans le but de valider le modèle, tous les paramètres de calage ont été extraits des essais avec des débits de 30ml/mn et 100ml/mn et nous avons appliqué le modèle pour un essai de 60ml/mn.

L'utilisation du modèle prédictif des profils de dépôt (par les paramètres de calage issus de nos conditions expérimentales) ne se superposent pas parfaitement avec toutes les données expérimentales en tout point de la colonne. Nous remarquons particulièrement que le dépôt ne se fait pas principalement à l'entrée de la colonne suivi par un front de colmatage, mais plutôt en profondeur et d'une manière aléatoire. L'efficacité de la rétention des particules dépend plutôt de la forme des pores rencontrée, commençant principalement par les porosités importantes, le dépôt s'homogénéise rapidement dans toute la colonne. Dans la plupart des simulations, la forme des profils de dépôt dans la colonne estimée à partir des hypothèses émises (*e.g.* chronologie des sites de saturations, le taux maximale de dépôt dépend du débit et de la porosité) ont la même allure que les profils de dépôt dans les essais expérimentaux. Cela prouve que le dépôt est bien

fonction de la porosité initiale. En revanche, la vitesse de dépôt dans les essais expérimentaux était plus rapide que dans les simulations. Afin de pallier cet écart quelques hypothèses sont émises :

- Prendre en compte l’effet de l’irrégularité de surface des sables (*e.g.* rugosités, aspérités) dans l’efficacité de collision des colloïdes. Il est important de souligner ce point car de nombreuses études du transport colloïdal et des études de filtration à l’échelle de la colonne ont été effectuées en utilisant un milieu poreux constitué de billes de verres sphériques et lisses. Des écarts significatifs sont constatés dans le calcul de l’efficacité du collecteur entre un cas d’étude modèle simple et un cas d’étude réaliste avec des grains de sables brutes sans traitements de lissage au préalable. Dans ce cas l’augmentation de l’efficacité de collision est de 2 à 3 fois plus importante (Auset et Keller, 2006). Jusque là, l’équation de l’efficacité du collecteur, modifiée depuis 1979 n’aborde pas la rugosité des surfaces, il est intéressant de rajouter un facteur de surface et de forme des grains dans le second terme de l’interception direct afin d’expliquer l’influence de la rugosité des grains et la géométrie des pores sur l’efficacité de la filtration ;
- Prendre en compte la forme des colloïdes dans la détermination du coefficient de dépôt va probablement jouer un rôle important dans la détermination de l’efficacité de collision. Habituellement, les études de filtration et particulièrement l’évaluation de l’efficacité de collision qui en découle ont été réalisées en utilisant des particules colloïdales sphériques dans un milieu granulaires lisses. Il peut y avoir des différences significatives entre les relations empiriques et les rétentions observées lorsque réellement des grains de sol rugueux sont considérés ;
- Augmenter la dispersion longitudinal α_L . Dans ce cas la convection domine sur la diffusion et les particules mobiles avancent plus rapidement dans la colonne. Par conséquent, les particules se déposent dans toute la colonne.

Une autre remarque concerne la géométrie des pores, le paramètre physique qui contrôle la limitation des déplacements des colloïdes par piégeage dans les espaces intergranulaire est la taille des gorges de pores d’accès. Par conséquent, une approche plus rigoureuse pour prédire le blocage des pores d’accès par « straining » tend à comparer la taille des colloïdes à la taille des pores critiques et non pas à la taille des grains qui constitue le milieu.

Conclusions et perspectives

Dans cette thèse, le travail a été focalisé sur le transport et le dépôt de particules fines argileuses à travers des milieux naturels sableux. L'objectif était de comprendre les phénomènes prédominants lors du colmatage en reliant des propriétés microscopiques à des mécanismes de dépôt afin de caractériser la migration des particules à l'échelle de la colonne. Les recherches ont été abordées sur la base de deux volets complémentaires, un premier volet expérimental, réalisé sur des colonnes de laboratoire et un autre volet numérique exploitant les résultats expérimentaux et réaliser à partir un modèle original de filtration capable de prédire le colmatage des filtres.

L'étude expérimentale dans des colonnes constituées de sables polydisperses nous a permis d'étudier l'influence de la taille des grains et de la porosité des couches constituant le milieu sur les phénomènes de migration et de dépôt des particules argileuses. Les principaux résultats trouvés dans ce cadre sont les suivants :

- Les mesures globales de la perméabilité par le capteur de pression différentielle sont interprétées par la loi de Darcy. Pour des essais à différents débits, nous avons constaté qu'un faible débit engendre des chutes de perméabilités globales plus importantes. En revanche, pour un débit donné l'influence de la granulométrie des filtres n'est pas apparue significative.
- Les mesures de la densité locale par le gammadensimètre d'une épaisseur de couche de 2cm ont permis d'estimer les porosités locales. L'évolution des porosités ainsi que l'estimation des surfaces spécifiques du milieu dans chaque couche ont permis de déterminer la perméabilité équivalente par le modèle de perméabilité de Kozeny-Carman.
- L'utilisation du modèle de Kozeny-Carman (choisi pour sa capacité à s'appliquer aux sols plastiques et non plastiques) pour la prédiction de la perméabilité ne pouvait se faire sans une étude microscopique (observations au MEB et essais au porosimètre à mercure) qui a permis de confirmer et de compléter la connaissance sur la forme du dépôt et la double porosité du milieu. Ce modèle nous a permis de prendre en compte l'hétérogénéité du milieu pour chaque couche, ainsi que l'évolution de la tortuosité du milieu. La comparaison entre le modèle utilisé et les résultats expérimentaux le long des essais donne de bonnes

approximations de l'évolution de la perméabilité globale et donc une bonne connaissance du colmatage des filtres.

- Dans la formation du dépôt, l'idée de celui-ci autour des grains et la formation des ponts de liaison entre les grains collecteurs a été nécessaire à la détermination de la surface spécifique du milieu. Nous avons proposé que le dépôt se faisait d'abord dans des sites de surfaces autour des collecteurs, suivi par des formations de pontages reliant les collecteurs. Dans cette première phase, plus la taille des grains est importante, plus longtemps va durer le dépôt autour de ceux-ci. Par ailleurs, pour un milieu dont la porosité initiale est faible, la seconde phase de dépôt se produit plus rapidement. Ainsi, la diminution de la perméabilité est plus faible pour les gros grains collecteurs dans la première phase, alors qu'elle est amplifiée dans la seconde phase de dépôt. En outre, une composition de filtre de gros graviers qui semble permettre une plus grande autonomie dans le fonctionnement d'un filtre n'est pas une bonne idée. Il faudrait travailler avec des mélanges de filtres afin d'avoir une bonne pérennité de l'ouvrage.

Dans la partie numérique, nous avons exploité les données expérimentales de transport et de dépôt des particules argileuses dans un milieu poreux granulaire et hétérogène en porosité afin de proposer un modèle macroscopique de filtration. Le modèle proposé est basé sur des modèles de convection-dispersion avec un terme puits qui détermine le dépôt occasionné dans le milieu. La contribution dans ce travail a été de mettre en avant la dépendance de la saturation des sites de rétention avec la porosité initiale du milieu, capable de piéger les particules en suspension.

Il a été constaté que :

- L'efficacité de la rétention des particules dépend de la porosité du milieu.
- La cinétique du second ordre s'est imposée, elle a permis de prendre en compte les particules déjà déposées dans les sites de rétention.
- Le faible débit est apparu comme un paramètre qui ne favorise pas le dépôt dans toute la colonne. En introduisant un coefficient fonction de la vitesse d'injection dans le paramètre de filtration, le modèle est capable de prendre en compte différentes vitesses d'injections dans le milieu.

La prédiction des profils de dépôt par le modèle proposé (par des paramètres de calage issus de nos conditions expérimentales) se superpose d'une manière correcte avec les données expérimentales dans les différents points de la colonne, principalement lorsque les diamètres de grains sont importants. L'efficacité de rétention des particules dépend plutôt du volume des pores, s'effectuant principalement dans les porosités importantes, ensuite le dépôt s'homogénéise rapidement dans toute la colonne. Dans la plupart des simulations, les formes des profils de dépôt compte tenu des hypothèses émises ont la même allure que les profils de dépôt issus des essais expérimentaux. Cela corrobore bien le fait que le dépôt est fonction de la porosité initiale.

En revanche, dans certains points, la vitesse de dépôt dans les essais expérimentaux est plus rapide que dans les simulations, ce qui nous a amené à émettre quelques hypothèses afin de consolider le modèle de prédiction de la perméabilité d'un milieu.

Les expériences menées ont permis de répondre à certaines questions sur l'influence des milieux hétérogènes dans la capture des particules. Les essais ont aussi fait apparaître d'autres interrogations dans le domaine expérimentale et corrélativement dans le domaine numérique.

Perspectives expérimentales :

On peut envisager d'autres essais expérimentaux permettant de tester la répétabilité de chaque essai réalisé dans les mêmes conditions. On peut également envisager d'autres essais en faisant varier certaines propriétés des matériaux et/ou en rajoutant d'autres techniques, par exemple :

- Déterminer la rugosité des surfaces de grains et effectuer des essais avec les mêmes sables mais des grains lissés. Une autre composition du filtre, par exemple tester des colonnes avec des mélanges de tailles de sables et aussi des couches de sables avec des tailles distincts (gros sables-sables fins-gros sables). Ces différentes compositions influenceront les chutes de la perméabilité globale ainsi que les dépôts de particules à l'échelle locale.
- Étant donné que la forme des pores et l'espace initial disponible sont primordiaux pour la détermination des quantités de particules déposées, il serait intéressant d'utiliser la microtomographie afin d'extraire par segmentation des images 3D de la distribution spatiales des pores. Cela nous renseignerait sur la distribution des points de contacts entre les grains et les sites de rétention dominants dans le milieu. Ce qui pourrait consolider nos hypothèses sur la forme de dépôt dans les milieux hétérogènes.
- Cette étude avait pour objectif la migration de particules fines dans des milieux hétérogènes dans des conditions défavorables pour le dépôt. Cependant, il serait intéressant d'étudier l'effet du pH et la force ionique dans le dépôt et le relargage des particules (cela permettrait de régénérer des filtres colmatés).
- Enfin, connaissant les profils de dépôt des particules de kaolinite dans un milieu poreux hétérogène, il serait intéressant dans le cadre de la pollution des eaux souterraines de voir comment cette argile pourrait véhiculer et déposer les polluants (métaux lourds dans le milieu). Cela en utilisant le banc gammadensimétrique et en faisant des prélèvements à la sortie de la colonne.

Perspectives numériques : La modélisation de la filtration par une cinétique de dépôt du second ordre pourrait être améliorée en prenant en compte :

- L'effet de l'irrégularité de surface des sables (*e.g.* rugosités, aspérités), ainsi que la forme des particules fines dans la détermination de l'efficacité de collision des particules fines.
- Les particules fines qui s'agrègent vont augmenter leurs tailles, cela pourrait être pris en compte dans le modèle au niveau du coefficient λ_0 .

-
- À l'aide des observations au MEB à l'échelle du pore, il serait intéressant de modéliser le dépôt à partir des images MEB et d'introduire la géométrie des pores dans un modèle microscopique (à l'échelle de quelques pores) afin de prendre en compte les mécanismes de dépôt à cette échelle et ensuite de les relier à notre modèle.

Bibliographie

- Al-Mukhtar, M., N. Belanteur, D. Tessier et S. Vanapalli. 1996, The fabric of clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states, *Applied Clay Science*, vol. 11, n° 2-4, p. 99–115.
- Alem, A., A. Elkawafi et A. Benamar. 2009, Transport et rétention de particules d'argile dans un milieu poreux saturé, dans *colloque international sols non saturés et environnement*, vol. 1, édité par UNSATlemcen09, p. 303–313.
- Auset, M. et A. Keller. 2006, Pore-scale visualization of colloid straining and filtration in saturated porous media using micromodels, *Water Resources Research*, vol. 42, n° 12, p. 1–9.
- Baghdikian, S., M. Sharma et L. Handy. 1989, Flow of clay suspensions through porous media, *SPE Reservoir Engineering*, vol. 4, n° 2, p. 213–220.
- Bear, J. 1972, *Dynamics of fluids in porous media*, Elsevier, New York.
- Bear, J. et Y. Bachmat. 1991, *Introduction to modeling of transport phenomena in porous media*, kluwer academic publishers, Dordrecht.
- Benamar, A., N. D. Ahfir, H. Wang et A. Alem. 2007, Particle transport in a saturated porous medium : Pore structure effects, *Compte Rendu Geoscience*, vol. 339, n° 10, p. 674–681.
- Benchabane, A. 2006, *Étude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères*, Thèse de doctorat, Université Strasbourg I, France.
- Bildstein, O. 1998, *Modélisation géochimique des interactions eau-gaz-roche. Application à la diagenèse minérale dans les réservoirs géologiques*, thèse de doctorat, Thèse de l'université Louis Pasteur de Strasbourg.
- Bortal, S. 2002, *Approche discrete de l'injection de suspensions de ciment dans les milieux poreux pulvérulents*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.
- Bouziri-Adrouche, S. 2007, *Études des mécanismes de déformation des argiles surconsolidées*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.

- Bradford, S. et M. Bettahar. 2006, Concentration dependent transport of colloids in saturated porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 82, n° 1-2, p. 99–117.
- Bradford, S., J. Simunek, M. Bettahar, M. V. Genuchten et S. Yates. 2003, Modeling colloid attachment, straining, and exclusion in saturated porous media, *Environmental Science Technology*, vol. 37, n° 10, p. 2242–2250.
- Bradford, S., S. Yates, M. Bettahar et J. Simunek. 2002, Physical factors affecting the transport and fate of colloids in saturated porous media, *Water Resources Research*, vol. 38, n° 12, p. 1–12.
- Carman, P. 1937, Fluid flow through granular beds, *Transactions Institution of Chemical Engineers*, vol. 15, p. 150–166.
- Chapuis, R. 2004, Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 41, n° 5, p. 787–795.
- Chapuis, R. 2008, Predicting the saturated hydraulic conductivity of natural soils, *Geotechnical news*, vol. 26, n° 2, p. 47–50.
- Chapuis, R. et M. Aubertin. 2003, On the use of the kozeny-carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils, *Canadian Geotechnique*, vol. 40, n° 3, p. 616–628.
- Chretien, J. et G. Pedro. 1987, Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques. cas des terrasses alluviales de la saône, *Cahiers - ORSTOM. Pédologie*, vol. 23, n° 1, p. 43–54.
- Civan, F. 2001, Scale effect on porosity and permeability : Kinetics, model, and correlation, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, vol. 47, n° 2, p. 271–287.
- Compère, F., G.Porel et F.Delay. 2000, Transport and retention of clay particles in saturated porous media. influence of ionic strength and pore velocity, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 49, p. 1–21.
- Costa, A. 2006, Permeability-porosity relationship : A reexamination of the kozeny-carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption, *Geophysical Research Letters*, vol. 33, n° 2, p. 1–5.
- Courcelles, B. 2007, *Étude du comportement physico-chimique des filtres des barrières perméables réactives : Modélisation et expérimentation à l'échelle pilote*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.

- Courcelles, B., A. Modaressi-Farahmand-Razavi, D. Gouvenot et A. Esnault-Filet. 2011, Influence of precipitates on hydraulic performance of permeable reactive barrier filters, *International Journal of Geomechanics*, vol. 11, n° 2, p. 142–152.
- Davis, J., N. Roy, P. Mozley et J. Hall. 2006, The effect of carbonate cementation on permeability heterogeneity in fluvial aquifers : An outcrop analog study, *Sedimentary geology*, vol. 184, p. 267–280.
- Deb, A. 1969, Theory of sand filtration, *Journal of the Sanitary Engineering Division*, vol. 95, p. 399–422.
- Delage, P. et F. Pellerin. 1984, Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du quebec, *Clay Minerals*, vol. 19, n° 2, p. 151–160.
- Delanchambre, Y. 1966, *Contribution à l'étude de l'écoulement d'une suspension à travers un milieu poreux et du mécanisme de la filtration*, Thèse de doctorat, Université de Nancy, France.
- Fatt, I. 1956, The network model of porous media, *Petroleum Transactions AIME*, vol. 207, p. 144–181.
- Fies, J. 1984, Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure, *Agronomie*, vol. 4, n° 9, p. 891–899.
- Gallo, Y. L., O. Bildstein et E. Brosse. 1998, Coupled reaction-flow modeling of diagenetic changes in reservoir permeability, porosity and mineral compositions, *Journal of Hydrology*, vol. 209, p. 366–388.
- Gao, C. 2007, Factors affecting particle retention in porous media, *Emirates journal of engineering research*, vol. 12, n° 3.
- Ghidaglia, C. 1994, *Filtration en profondeur des particules*, Thèse de doctorat, Université de Paris VI, France.
- Gohr Pinheiro, I., P. Schmitz et D. Houi. 1999, Particle capture in porous media when physico-chemical effects dominate, *Chemical Engineering Science*, vol. 54, n° 17, p. 3801–3813.
- Grunberger, D., I. jeran Maigre, B. Velde et D. Tessier. 1994, Mesure de la réorientation des particules de kaolinite lors de la compaction par observation directe, *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Paris série II*, vol. 318, n° 5, p. 627–633.

- Guillot, X., M.Al-Mukhtar, F. Bregaya et J. Fleureau. 2002, Estimation de la porosité dans un matériau argileux, *Comptes Rendus Geosciences*, vol. 334, n° 2, p. 105–109.
- Hammad, T. 2010, *Comportement des sédiments marins de grande profondeur : Approche multi-échelle*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.
- Happel, J. 1958, Viscous flow in multiparticle systems : Slow motion of fluids relative to beds of spherical particles, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, vol. 4, n° 2, p. 197–201.
- Hassan, M. S. 2005, *Étude des hétérogénéités morphologiques et énergétiques superficielles des kaolinites par AFM et adsorption de gaz*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Hazen, A. 1911, Discussion of *Dams on sand formations, by A.C.Koenig*. *Transactions of the American Society of Civil*, vol. 73, p. 199–203.
- Heertjes, R. et C. Lerk. 1967, The functioning of deep bed filters, *Transactions Institution of Chemical Engineers*, vol. 45, p. T138.
- Henderson, N., J. Brêttas et W. Sacco. 2010, A three-parameter kozeny-carman generalized equation for fractal porous media, *Chemical engineering science*, vol. 65, n° 15, p. 4432–4442.
- Hernandez, A., J. Calvo, P. Danos, L.Palacio, M. Rodriguez et J. de Saja. 1997, Surface structure of microporous membranes by computerized sem image analysis applied to anopore filters, *Journal of Membrane Science*, vol. 137, n° 1-2, p. 89–97.
- Herzig, J. et P. L. Goff. 1972a, Filtration dans les lits épais. I. résultats expérimentaux sur le colmatage et décolmatage, *Powder Technology*, vol. 5, n° 3, p. 195–200.
- Herzig, J. et P. L. Goff. 1972b, Filtration dans les lits épais. II. interprétation microscopique du colmatage, *Powder Technology*, vol. 5, n° 4, p. 223–228.
- Herzig, J., D. Leclerc et P. LeGoff. 1970, Flow of suspensions through porous media, application to deep filtration, *Industrial and engineering chemistry*, vol. 62, n° 5, p. 8–35.
- Hicher, P., H. Wahyudi et D. Tessier. 2000, Microstructural analysis of inherent and induced anisotropy in clay, *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, vol. 5, n° 5, p. 341–371.
- Honjo, Y. et D. Veneziano. 1989, Improved filter criterion for cohesionless soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 115, n° 1, p. 75–94.
- Ives, K. 1960, Rational design of filters, *Proc.Inst.Civil.Engrs(London)*, vol. 16, p. 189.

- Ives, K. 1969, Theory of filtration, dans *special subject*, vol. 7, International Water Supply Cong, Vienna.
- Ives, K. et I. Sholji. 1965, Research on variables affecting filtration, *Journal Sanitary Engineering Division, American Society of Civil Engineers, ASCE*, vol. 91, n° SA4, p. 1–18.
- Iwasaki, T. 1937, Some notes on sand filtration, *Journal of American Water Works Association*, vol. 29, n° 5, p. 1591–1602.
- Kim, S. et M. Corapcioglu. 1997, The role of biofilm growth in bacteria-facilitated contaminant transport in porous media, *Transport in Porous Media*, vol. 26, n° 2, p. 161–181.
- Kim, Y. et A. Whittle. 2006, Filtration in a porous granular medium : 1. simulation of pore-scale particle deposition and clogging, *Transport in Porous Media*, vol. 65, n° 1, p. 53–87.
- Kozeny, J. 1927, Ueber kapillare leitung des wassers im boden, *Stizungsber Akad Wiss Wien*, vol. 136, n° 2a, p. 271–306.
- Kretzschmar, R., K. Barmettler, D. Grolimund, Y. Yan, M. Borkovec et H. Sticher. 1997, Experimental determination of colloid deposition rates and collision efficiencies in natural porous media, *Water Resources Research*, vol. 33, n° 5, p. 1129–1137.
- Kretzschmar, R. et H. Sticher. 1998, Colloid transport in natural porous media : Influence of surface chemistry and flow velocity, *Physical. Chemical. Earth*, vol. 23, n° 2, p. 133–139.
- Kuwabara, S. 1959, The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinders or spheres in a viscous flow at small reynold numbers, *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 14, n° 4, p. 527.
- Ma, H. et W. Johnson. 2010, Colloid retention in porous media of various porosities : Predictions by the hemispheres-in-cell model, *Langmuir : Journal of American Chemical Society*, vol. 26, n° 3, p. 1680–1687.
- Mackinnon, I. 1993, Kaolinite particle sizes in the $< 2\mu\text{m}$ range using laser scattering, *Clays and Clay Minerals*, vol. 41, n° 5, p. 613–623.
- Mackrle, V., O. Draka et J.Svec. 1965, Hydrodynamics of the disposal of low level liquid radioactive wastes in soil. final report, cahier de recherche, International Atomic Energy Agency.
- Maroudas, A. et P. Eisenklam. 1965, Clarification of suspensions : a study of particle deposition in granular media, part ii - a theory of clarification, *Chemical Engineering Science*, vol. 20, n° 10, p. 875–888.

- McCarthy, J. et J. Zachara. 1989, Subsurface transport of contaminants, *Environmental Science Technology*, vol. 23, n° 5, p. 496–502.
- McDowell-Boyer, L., J. Hunt et N. Sitar. 1986, Particle transport through porous media, *Water Resources Research*, vol. 22, n° 13, p. 1901–1921.
- Mehter, A., R. Turian et C. Tien. 1970, Filtration in deep beds of granular activated carbon, cahier de recherche 70-3, FWPCA Grant No.17020 OZO, Syracuse University.
- Mitchell, J. K. 1993, *Fundamentals of Soil Behaviour*, John Wiley and Son Inc. 2nd edn, New York.
- Moghadasi, J., H. Muller-Steinhagen, M. Jamialahmadi et A. Sharif. 2004, Theoretical and experimental study of particle movement and deposition in porous media during water injection, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 43, n° 3-4, p. 163–181.
- Nadji, D. 1998, *Colmatage d'un milieu modèle par une suspension d'argile : application au colmatage des chaussées poreuses*, Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- NAVFAC. 1974, Soil mechanics, foundations, and earth structures, *Facilities Engineering Command (NAVFAC) design manual DM7. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.*
- Pabst, W., K. Kune et E. Gregorová. 2000, A note on particle size analyses of kaolins and clays, *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 20, n° 9, p. 1429–1437.
- Payatakes, A., C. Tien et R. Turian. 1973, A new model for granular porous media : Part i. model formulation, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, vol. 19, n° 1, p. 58–67.
- Pellerin, F. 1979, La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches, *Liaison Lab. Ponts et chaussées*, vol. 106, p. 105–116.
- Pluart, L. L., J. Duchet, H. Sautereau, P. Halley et J.F.Gerard. 2004, Rheological properties of organoclay suspensions in epoxy network precursors, *Applied Clay Science*, vol. 25, n° 3-4, p. 207–219.
- Porubcan, A. et S. Xu. 2011, Colloid straining within saturated heterogeneous porous media, *Water Research*, vol. 45, n° 4, p. 1796–1806.
- Rajagopalan, R. et C.Tien. 1976, Trajectory analysis of deep bed filtration with the sphere-in-cell porous media model, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, vol. 22, n° 3, p. 523.

- Reddi, L., M. Xiao, M. Hajra et I. Lee. 2000, Permeability reduction of soil filters due to physical clogging, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 126, n° 3, p. 236–246.
- Rege, S. et H. Fogler. 1988, A network model for deep bed filtration of solid particles and emulsion drops, *American Institute of Chemical Engineers*, vol. 34, n° 11, p. 1761–1772.
- Ruiz, V. C. 2009, *Transport de colloïdes en milieu poreux : étude expérimentale*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France.
- Ryan, J. et M. Elimelech. 1996, Colloid mobilization and transport in groundwater, *Colloids and surfaces A :Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 107, p. 1–56.
- Saiers, J. et G. Hornberger. 1994, First-and second-order kinetics approaches for modeling the transport of colloidal particles in porous media, *Water Resources Research*, vol. 30, n° 9, p. 2499–2506.
- Solymar, M. et I. Fabricius. 1999, Image analysis and estimation of porosity and permeability of arnager greensand, upper cretaceous, denmark, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A*, vol. 24, n° 7, p. 587–591.
- Souli, H. 2006, *Études hydromécanique et physico-chimique de deux argiles en présence de cations métalliques*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.
- Taylor, D. 1948, Fundamentals of soil mechanics, *John Wiley & Sons, New York*.
- Tessier, D. 1984, *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structure au cours de la dessiccation et de la réhumectation*, Thèse de doctorat, Université de Paris VII, France.
- Tessier, D., A. Lajudie et J. Petit. 1992, Relation between the macroscopic behavior of clays and their microstructural properties, *Applied geochemistry*, vol. 7, n° 1, p. 151–161.
- Tien, C. 1989, *Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols*, Butterworth Publishing Co, Boston.
- Tien, C. et A. Payatakes. 1979, Advances in deep bed filtration, *American Institute of Chemical Engineers Journal*, vol. 25, n° 5, p. 737–759.
- Todd, A., J. Somerville, G. Scott et U. Heriot-Watt. 1984, The application of depth of formation damage measurements in predicting water injectivity decline, *Society of Petroleum Engineers*.

- Touret, O., C. Pons, D. Tessier et Y. Tardy. 1990, Etude de la répartition de l'eau dans les argiles saturées mg 2+ aux fortes teneurs en eau, *Clay minerals*, vol. 25, n° 2, p. 217–233.
- Vasseur, G., I. Djeran-Maigre, D. Grunberger, G. Rousset, D. Tessier et B. Velde. 1995, Evolution of structural and physical parameters of clays during experimental compaction, *Marine and Petroleum Geology*, vol. 12, n° 8, p. 941–954.
- Vennat, E. 2009, *Étude numérique et expérimentale de l'infiltration de la dentine déminéralisée en surface par des résines composites*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.
- Wahyudi, H. 1991, *Étude des propriétés mécaniques des matériaux argileux en relation avec leur organisation à différentes échelles*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.
- Wantanaphong, J., S. Mooney et E. Bailey. 2006, Quantification of pore clogging characteristics in potential permeable reactive barrier(prb) substrates using image analysis, *Journal of Contaminant Hydrology*, vol. 86, n° 3-4, p. 299–320.
- Xu, P. et B. Yu. 2008, Developing a new form of permeability and kozeny carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry, *Advances in water resources*, vol. 31, n° 1, p. 74–81.
- Xu, S., B. Gao et J. Saiers. 2006, Straining of colloidal particles in saturated porous media, *Water Resources Research*, vol. 42, n° W12S16, p. 10 PP.
- Xu, S., Q. Liao et E. Saiers. 2008, Straining of nonspherical colloids in saturated porous media, *Environmental Science Technology*, vol. 42, n° 3, p. 771–778.
- Yao, K., M. Habibian et C. O'Melia. 1971, Water and waster filtration : Concepts and applications, *Environmental Science and Technology*, vol. 5, n° 11, p. 1105–1112.
- Yu, B. et J. Li. 2004, A geometry model for tortuosity of flow path in porous media, *Chinese Phys Lett*, vol. 21, n° 8, p. 1569–1571.
- Zaiter-AlHouayek, M. 2005, *Étude des matériaux constituant les barrières perméables réactives pour le traitement de l'arsenic : conception, expérimentation, modélisation*, Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France.
- Zamani, A. et B. Maini. 2009, Flow of dispersed particles through porous media-deep bed filtration, *Petroleum Science and Engineering*, vol. 69, n° 1-2, p. 71–88.
- Zhao, Q. 1994, *Modelling removal efficiency for polydisperse suspensions in deep bed filtration*, thèse de doctorat, A thesis of the university of Dundee.

Annexe A

Mode opératoire

A.1 Présentation du pilote expérimental

Le pilote expérimental qui se trouve à l'école centrale est doté de :



Figure A.1 – pilote expérimental.

- 3 colonnes de filtration de 90cm de hauteur et 10cm de diamètre, dans chaque colonne on trouve :
 - ◇ un capteur de pression différentielle ;
 - ◇ un capteur de pH ;
 - ◇ un capteur de conductivité électrique couplé à celle de la température ;

Chaque colonne est reliée à :

- La centrale d’acquisition, celle-ci est raccordée à un ordinateur afin de récupérer les enregistrements en continu. Pour imposer un débit pour chaque essai, nous avons :
- Une pompe péristaltique ;
- Un débitmètre électromagnétique ;
- Une boîte à effet de venturi ;

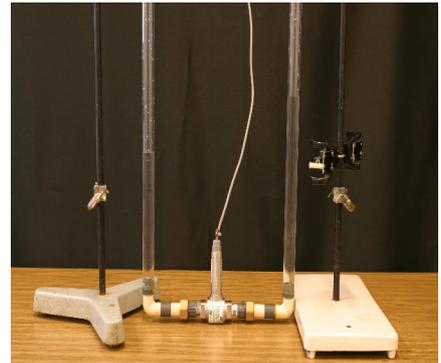
Avant chaque essai un étalonnage de la pompe péristaltique d’alimentation en eau est effectué (suivant le manuel de la pompe). Pour contrôler les valeurs du débit en entrée et en sortie d’une colonne, on peut choisir un débit d’entrée, ensuite pomper l’eau en chronométrant à la sortie de la colonne. Une fois cette étape réalisée nous pouvons procéder à l’étalonnage des capteurs (pression différentielle, pH, conductivité électrique).

A.2 Étalonnage des capteurs

Le boîtier d'acquisition est raccordé à un ordinateur. Nous avons utilisé le programme « CONTROL V5 » pour l'acquisition des données. Cela nous permet de choisir les fréquences de mesures et les fréquences d'impressions sur l'écran. Par ailleurs les facteurs d'étalonnage des capteurs sont directement introduits dans le logiciel.

A.2.1

Afin d'étalonner le capteur de pression différentielle, nous avons mis en place un système qui relie les deux cotés du capteur à deux tubes. En variant la différence de hauteur d'eau entre les deux tubes on enregistre à chaque étape la pression différentielle et on la compare avec la différence de charge déjà imposée. On trace alors la variation de charge en fonction de la pression différentielle, nous obtenons la valeur de la mise en zéro de la pression et la valeur de la pente. On introduit ces deux valeurs dans le programme « CONTROL V5 » afin d'étalonner le capteur, ensuite on refait l'essai avec les nouvelles valeurs pour s'en assurer.



A.2.1

A.2.2

L'étalonnage du capteur de pH se fait au moyen de solutions tampons de pH4, pH7, pH10. Nous avons la valeur réelle de la solution dans laquelle on mettra la sonde et nous imprimons le pH enregistré par le capteur. En répétant l'opération pour les autres pH, nous pouvons tracer le pH réel en fonction du pH mesuré, ce qui nous donne la pente de la droite. Afin de vérifier notre étalonnage, on peut recommencer l'opération avec deux points de pH et vérifier pour le troisième. Pendant la manipulation on doit à chaque étape tremper notre sonde dans une eau à pH neutre afin que les valeurs soient précises. A la fin de chaque essai les sondes pH sont stockées dans une solution KCl.



A.2.2

A.2.3

Les mêmes opérations sont effectuées pour la sonde de conductivité électriques pour les valeurs de chlorure de potassium de 0,01mol/l, 0,1mol/l, et 3mol/l.



A.2.3

A.3 Manipulation de la colonne

A.3.1 Isolement d'une colonne

Une vidange de la colonne doit être faite après chaque essai. Avant de procéder au démontage d'une des colonnes, nous devons nous assurer que tous les robinets soient bien fermés en amont et en aval de la colonne mais aussi dans les passages latéraux.



3.1

A.3.2 Démontage d'une colonne

3.2.1 Démontage de la sonde pH électriquement puis mécaniquement et ensuite la stocker dans une solution KCL.



3.2.1

3.2.2 Démontage de la sonde de conductivité électrique.



3.2.2

3.2.3 Démontage des manchons d'adaptation en entrée et en sortie du capteur de pression différentielle et le dégagement du capteur sans le débrancher électriquement.



3.2.3

3.2.4 Démontage des quatre robinets à bille PVC, sur le coté gauche de la colonne. Ils servent à faire des prélèvements de solution durant un essai.



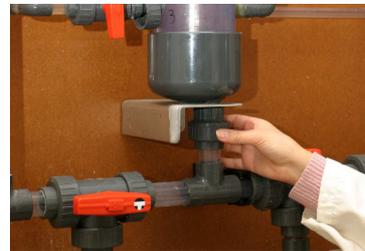
3.2.4

3.2.5 Démontage du manchon d'adaptation en sortie de la colonne.



3.2.5

3.2.6 Démontage du manchon d'adaptation en entrée de colonne.



3.2.6

3.2.7 Ouverture des deux colliers de maintien de la colonne ou alors démontage des deux colliers derrières en enlevant les visses.



3.2.7

3.2.8 Quand on aura tout dévissé et démonté on peut extirper la colonne en faisant attention au support de la colonne où l'ouverture est sur le coté droit.



3.2.8

A.3.3 Remplissage et remise en place d'une colonne

3.3.1 Placez un filtre en bas de la colonne, remplissez la colonne par les matériaux inertes et grossiers sur 10 cm, suivis par les matériaux étudiés, ensuite placez un deuxième filtre en fin de remplissage de la colonne. Ceci pour éviter toute érosion éventuelle des fines particules.



3.3.1

3.3.2 Après avoir remonté la colonne, il faut remettre les capteurs (pH, conductivité électrique, pression différentielle) et ensuite s'assurer que tous les bouchons sont bien refermés ainsi que les colliers de stauff pour maintenir la position de la colonne.



3.3.2

3.3.3 Après avoir connecté la colonne et vérifié toutes les liaisons, on peut commencer la mise en eau en s'orientant suivant les flèches indiquées sur les robinets afin d'orienter nos eaux et choisir le type de remplissage (parallèle ou en série).



3.3.3