

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE
ENERGIE, MATERIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

[ÉQUIPE de RECHERCHE ou LABORATOIRE ISTO]

THÈSE présentée par :

Emélie Viel

soutenue le : **14 octobre 2016**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Géosciences

**Etude des processus de transport des solutés hors équilibre
physique.**

Application à la zone non saturée des Calcaires de Beauce.

THÈSE dirigée par :
Yves Coquet

Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :
Sylvie Dousset
Laurent Lassabatere

Professeur, Université de Lorraine
Ingénieur TPE, HDR, ENTPE

JURY

Jean Louis Rouet
Yves Coquet
Sylvie Dousset
Laurent Lassabatere
Stéphane Binet
Valérie Pot

Professeur, Université d'Orléans Président du jury
Professeur, Université d'Orléans
Professeur, Université de Lorraine
Ingénieur TPE, HDR, ENTPE
Maître de Conférences, Université d'Orléans
Chargée de recherche, INRA

Remerciements

Tous d'abord, je remercie mon directeur de thèse, Yves Coquet, pour son encadrement et pour la confiance qu'il m'a accordés, notamment sur les dépenses, qui ont été nombreuses.

Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mes rapporteurs, Sylvie Dousset et Laurent Lassabatere, et aux membres du jury, Stéphane Binet, Jean-Louis Rouet, Valérie Pot, pour leurs remarques et le temps qu'ils y ont consacré.

J'aimerais tout particulièrement remercier Stéphane Binet, tout d'abord pour les cours qu'il m'a dispensés en Licence et en Master, ici, à Orléans, et qui ont eu un impact important sur mon orientation et le choix de cette thèse, ainsi que pour sa présence, ses échanges tout au long de ces 3 années et avant ça en stage de recherche.

Je remercie également tous les enseignants orléanais qui m'ont transmis leurs passions pour les sciences de la terre, je pense notamment à Patrick Alberic, Max Vidal, qui ont pris leur retraite, Lionel Mercury, Mohammed Boussafir, ainsi que Nicole Le Breton pour la grande pédagogie de ses cours (même si j'ai toujours pas tout compris sur le métamorphisme !).

Je voudrais remercier mes collègues avec qui j'ai travaillé sur le terrain et en laboratoire : Carlos Aldana, Chloé Claurel, Myriam Dedewanou, Nicolas Peyraube, Nathalie Lottier, Claude Le Milbeau, Olivier Rozenbaum, ainsi que mes collègues de bureau.

Remercier tous ceux qui ont pu me donner des coups de main que certains penseront anecdotique mais qui m'ont permis d'avancer, Didier Bellenoux, Perdereau Laurent, Franck Le Moing, Jeremy Jacob, Philippe Leroy, ainsi que Marielle Haton, sans qui on ne pourrait pas trouver le matériel pour réaliser ses manip'.

Je souhaite adresser un grand merci à l'équipe de l'atelier, Rémi, Frederic , Rémy, Esteban, pour l'excellent travail de réalisation du dispositif expérimental ainsi que leur grande disponibilité.

J'aimerais aussi remercier toutes les personnes indispensables sans qui le travail serait beaucoup plus long et dur, Marie-Noëlle Pailhès, Virginie Lancelot et Olivier Gaudefroy.

J'aimerais remercier mes amis, qui ont été présents et compréhensifs (surtout durant la phase de rédaction). Je REMERCIE toute ma famille qui m'a entouré et apporté tout son soutien depuis 3 ans, mais aussi depuis les 22 ans encore d'avant. Je remercie ma mère pour son expertise orthographe et grammaire, mon père et Quentin pour les expertises en photographie et appareil photo, Aloïse mon coach '*in English*' pour son expertise traduction et prononciation, et Céline pour son soutien et son réconfort.

J'espère n'avoir oublié personne ! Si c'est le cas, n'hésitez pas à faire une réclamation.

Tables des matières

1	CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	22
1.1	INTRODUCTION GENERALE	22
1.1.1	Contexte de l'étude.....	22
1.1.2	Objectif de l'étude.....	26
1.1.3	Structure de la thèse	26
1.2	CONCEPTS DE BASE	27
1.2.1	Physique de l'eau dans le sol et la ZNS	27
1.2.1.1	Les trois phases du sol.....	27
1.2.1.2	La porosité.....	28
1.2.1.3	La masse volumique apparente	28
1.2.1.4	L'état hydrique	29
1.2.1.4.1	Teneur en eau.....	29
1.2.1.4.2	Potentiel hydrique (ψ).....	29
1.2.1.4.3	Courbe de rétention en eau	30
1.2.2	Les transferts d'eau et de solutés dans le continuum ZNS-ZS.....	31
1.2.2.1	Le continuum ZNS-ZS	31
1.2.2.2	Ecoulements en milieu saturé : La loi de Darcy.....	32
1.2.2.3	Ecoulements en milieu non saturé : La Loi de Buckingham-Darcy.....	33
1.2.2.4	Ecoulements en régime transitoire.....	33
1.2.2.4.1	Equation de conservation de l'eau	33
1.2.2.4.2	L'équation de Richards	34
1.2.3	Transport des solutés.....	35
1.2.3.1	Densité de flux de solutés.....	35
1.2.3.2	Equation de la conservation de la masse.....	37
1.2.3.3	Equation de convection-dispersion (CDE).....	37
1.2.3.4	Courbe de percée.....	38
1.2.3.5	Phénomènes hors équilibre	39
1.2.3.5.1	Transfert dans les milieux non saturés.....	39
1.2.3.5.2	Transport préférentiel sur le terrain.....	39
1.2.3.5.3	L'interruption de flux comme outil d'étude des phénomènes hors équilibre..	40
1.2.4	Modèles hors équilibre	42
1.2.4.1	Modèle hors équilibre physique	43
1.2.4.2	Modèle eau mobile-eau immobile (MIM)	44
2	CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES	48
2.1	LA ZONE NON SATUREE ETUDIEE	50
2.1.1	Localisation.....	50
2.1.2	Contexte.....	52
2.1.2.1	Contexte géographique	52
2.1.2.2	Contexte géologique	54

2.1.2.3	Fonctionnement hydrique	55
2.1.2.4	Problématique de pollution sur la commune de Chartres	56
2.1.3	<i>Echantillonnage et prélèvements</i>	59
2.1.3.1	Echantillonnage	59
2.1.3.2	Prélèvements.....	59
2.2	EXPERIENCES D'ELUTION SUR COLONNE	61
2.2.1	<i>Conception du dispositif</i>	61
2.2.1.1	Simulateur de pluie	61
2.2.1.2	Cylindre.....	62
2.2.1.3	Base de la colonne.....	62
2.2.2	<i>Méthode d'analyse des traceurs : HPLC</i>	63
2.2.2.1	Choix des traceurs	63
2.2.2.2	Principe de l'HPLC	63
2.2.2.3	Calibration multi-traceurs	64
2.2.3	<i>Instrumentation des colonnes</i>	65
2.2.4	<i>Mise en place des colonnes</i>	66
2.2.4.1	Installation de la base	66
2.2.4.2	Continuité hydraulique	67
2.2.5	<i>Protocoles d'élution</i>	67
2.2.5.1	Choix des intensités de précipitation	67
2.2.5.2	En régime permanent	68
2.2.5.3	En régime transitoire	69
2.2.5.3.1	Protocole d'injection en régime transitoire : interruption de flux	69
2.2.5.3.2	Protocole d'injection en régime transitoire : interruption de flux avec drainage	70
2.2.6	<i>Analyse des courbes de percée</i>	71
2.2.6.1	Courbes de percée	71
2.2.6.2	Estimation des paramètres de transport.....	72
2.3	CARACTERISATION DES COLONNES.....	73
2.3.1	<i>Protocole de traçage au bleu brillant et démontage de la colonne</i>	73
2.3.1.1	La molécule Bleu brillant.....	73
2.3.1.2	Injection du bleu brillant.....	74
2.3.1.3	Plan d'échantillonnage dans la colonne	74
2.3.2	<i>Méthode d'analyse : spectrophotométrie</i>	75
2.3.2.1	Principe de la spectrophotométrie	75
2.3.2.2	Calibration	75
2.3.3	<i>Caractérisation physique de la colonne</i>	76
2.3.3.1	Teneur en eau	76
2.3.3.2	Granulométrie.....	76
2.3.4	<i>Caractérisation de la porosité des sous-échantillons des colonnes</i>	77
2.3.4.1	Tomographie des micro-colonnes	77
2.3.4.2	Porosimétrie au mercure	77

2.3.4.3	Rétention en eau.....	78
2.3.5	Cartographie de la présence de bleu brillant par analyse d'image.....	78
2.4	MODELISATION : IMPACT DU LIT DE BILLES DE VERRE SUR LES COURBES D'ELUTION.....	79
2.4.1	Obtention des paramètres.....	79
2.4.1.1	pour les billes de verre.....	79
2.4.1.1.1	Essai de perméabilité à charge variable.....	79
2.4.1.1.2	Courbe de $\theta(h)$ des billes de verres.....	79
2.4.1.2	pour le calcaire.....	80
2.4.2	Stratégie d'optimisation des paramètres.....	80
2.4.2.1	Ajustement $\theta(h)$	80
2.4.2.2	Estimation de $K(h)$	80
2.4.2.3	Double optimisation de $\theta(h)$ et $K(h)$	81
2.4.2.4	Optimisation des courbes de récession du débit.....	81
2.4.3	Simulation sous HYDRUS-1D.....	81
2.4.4	Evaluation du modèle.....	82
2.5	EXPERIENCES DE TRAÇAGE SUR LE TERRAIN.....	82
2.5.1	Traçage à l'ion bromure.....	82
2.5.1.1	Echantillonnage.....	82
2.5.1.1.1	Façonnage du site.....	82
2.5.1.1.2	Méthode d'échantillonnage des eaux du sol : bougies poreuses.....	82
2.5.1.1.3	Plan d'échantillonnage.....	83
2.5.1.2	Protocole d'injection.....	84
2.5.1.2.1	Estimation du débit (Q).....	85
2.5.1.2.2	Masse totale restituée (M).....	85
2.5.1.3	Analyse des eaux par chromatographie ionique.....	85
2.5.1.4	Interprétation des courbes.....	86
2.5.2	Traçage au Bleu Brillant.....	86
2.5.2.1	Injection.....	86
2.5.2.2	Plan d'échantillonnage.....	86
2.5.2.3	Caractérisation des lithologies.....	87
2.5.2.3.1	Granulométrie.....	87
2.5.2.3.2	Porosimètre au mercure.....	87
2.5.2.3.3	Infiltrométrie à disques.....	87
2.5.2.4	Traitement d'image : analyse du bleu brillant.....	88
2.5.2.4.1	Cartographie de la présence du bleu brillant.....	88
2.5.2.4.2	Analyse de la dispersion spatiale.....	89
3	CHAPITRE 3 : RESULTATS DES EXPERIENCES EN LABORATOIRE.....	90
3.1	RESULTATS DES EXPERIENCES D'ELUTION SUR COLONNES EN REGIME PERMANENT.....	92
3.1.1	Les courbes de percée.....	92
3.1.1.1	Colonne 6.....	92
3.1.1.1.1	Faible intensité (4 mm/h) : « Temps de crachin ».....	92
3.1.1.1.2	Intensité moyenne (8 mm/h) : « Temps de chien ».....	97

3.1.1.1.3	Forte intensité (16 mm/h) : « Temps à tomber des cordes »	97
3.1.1.2	Colonne 8	98
3.1.1.2.1	Faible intensité (4 mm/h) : « Temps de crachin ».....	98
3.1.1.2.2	Intensité moyenne (8 mm/h) : « Temps de chien ».....	103
3.1.1.2.3	Forte intensité (16 mm/h) : « Temps à tomber des cordes »	103
3.1.1.3	Colonne 3	104
3.1.1.4	Comportement des traceurs	105
3.1.1.5	Hétérogénéité des perméabilités	105
3.1.1.5.1	Suivi instrumental.....	105
3.1.1.5.2	Profil de conductivité hydraulique	110
3.1.2	<i>Discussion</i>	112
3.1.2.1	Reproductibilité des courbes de percée.....	112
3.1.2.2	Interprétation des écoulements.....	114
3.1.2.3	Estimation des paramètres de transport.....	115
3.1.2.4	Impact du diamètre de la colonne.....	116
3.1.3	<i>Synthèse</i>	116
3.2	RESULTATS DES EXPERIENCES D'ELUTION SUR COLONNES EN REGIME TRANSITOIRE	118
3.2.1	<i>Interruption de flux sans drainage de la colonne</i>	118
3.2.1.1	Colonne 6	118
3.2.1.1.1	Scénario 1 : Interruption de flux « par temps de crachin »	118
3.2.1.1.2	Scénario 2 : Interruption de flux « par temps de chien »	118
3.2.1.2	Colonne 8	120
3.2.1.2.1	Scénario 1 : Interruption de flux « par temps de crachin »	120
3.2.1.2.2	Scénario 2 : Interruption de flux « par temps de chien »	121
3.2.1.3	Suivi instrumental	123
3.2.1.1	<i>Discussion</i>	127
3.2.1.1.1	Déformation de la courbe de percée	127
3.2.1.1.2	Interprétation de la dynamique hydrique des colonnes	128
3.2.1.2	<i>Synthèse</i>	129
3.2.1.3	Courbe de percée : Colonne 6.....	129
3.2.1.3.1	Scénario 1 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin »	129
3.2.1.3.2	Scénario 2 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien ».....	130
3.2.1.3.3	Scénario 3 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin » puis reprise « par temps de chien ».....	133
3.2.1.3.4	Scénario 4 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien » puis reprise « par temps de crachin »	133
3.2.1.4	Courbe de Percée : Colonne 8.....	136
3.2.1.4.1	Scénario 1 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin »	136
3.2.1.4.2	Scénario 2 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien ».....	136
3.2.1.4.3	Scénario 3 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin » puis reprise « par temps de chien ».....	139

3.2.1.4.4	Scénario 4 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien » puis reprise « par temps de crachin »	139
3.2.1.5	Suivi instrumental	142
3.2.1.5.1	Colonne 6.....	142
3.2.1.5.2	Colonne 8.....	142
3.2.1.5.3	Estimation de $K(h)$	145
3.2.1.6	Discussion	146
3.2.1.6.1	Déformation de la courbe de percée du traceur C_0	146
3.2.1.6.2	Déformation de la courbe de percée du traceur C_1	150
3.2.1.7	Synthèse.....	153
3.3	RESULTATS DES CARACTERISATIONS DES COLONNES	155
3.3.1	<i>Caractérisation de la colonne avant la découpe</i>	155
3.3.1.1	Colonne 6	155
3.3.1.1.1	Suivi de la concentration.....	155
3.3.1.1.2	Suivi instrumental.....	157
3.3.1.2	Colonne 8	157
3.3.1.2.1	Suivi de la concentration.....	157
3.3.1.2.2	Suivi instrumental.....	159
3.3.1.3	Cartographie du Bleu Brillant	159
3.3.1.3.1	Colonne 6.....	159
3.3.1.3.2	Colonne 8.....	164
3.3.1.4	Caractérisation des lithologies	167
3.3.1.4.1	Granulométrie.....	167
3.3.1.4.2	Distributions de taille des pores	169
3.3.1.4.3	Description des pores.....	171
3.3.2	<i>Discussion</i>	173
3.3.2.1	Impact de la lithologie sur les chemins d'écoulement	173
3.3.2.2	Discretisation des lithologies	173
3.3.3	<i>Synthèse</i>	174
3.4	MODELISATION DES COURBES DE PERCEE : ETUDE DE L'INFLUENCE DU LIT DE BILLES DE VERRE A LA BASE DE LA COLONNE	174
3.4.1	<i>Optimisation des paramètres</i>	174
3.4.1.1	Paramètres du lit de billes de verre	174
3.4.1.1.1	Estimation de K_s	174
3.4.1.1.2	Ajustement des courbes de rétention en eau.....	175
3.4.1.2	Paramètres du matériau calcaire	176
3.4.1.2.1	Estimation de K_s	176
3.4.2	<i>Variabilité des courbes de percée à faible intensité de précipitation</i>	179
3.4.2.1	Prise en compte du lit de billes de verre.....	179
3.4.2.2	Variabilité du K_s	183
3.4.3	<i>Discussion</i>	185
3.4.3.1	Optimisation du K_s	185

3.4.3.2	Rééquilibrage des billes de verres	185
3.4.4	Synthèse.....	187
4	CHAPITRE 4 : RESULTATS DES EXPERIENCES SUR LE TERRAIN.....	189
4.1	DESCRIPTION DE LA FOSSE.....	191
4.1.1	Observations lithologiques.....	191
4.1.2	Caractérisation des lithologies.....	193
4.1.3	Discussion	195
4.1.3.1	Du terrain vers la carte géologique	195
4.1.3.2	Du terrain vers les colonnes en laboratoire.....	195
4.1.4	Synthèse.....	196
4.2	TRAÇAGE A L'ION BROMURE	197
4.2.1	Restitution de l'ion bromure.....	197
4.2.1.1	Partie gauche de la fosse.....	197
4.2.1.2	Partie droite de la fosse.....	199
4.2.2	Ajustement STANMOD.....	199
4.2.3	Discussion	200
4.2.3.1	Interprétation des écoulements à l'échelle de la fosse	200
4.2.3.2	Estimation des paramètres de transport à partir des données de terrain.....	202
4.2.3.3	Etude multi-échelle des paramètres de transport.....	202
4.2.4	Synthèse.....	203
4.3	TRAÇAGE AU BLEU BRILLANT	203
4.3.1	Description des écoulements	204
4.3.1.1	Forme du front d'infiltration	204
4.3.1.2	Distribution des écoulements	206
4.3.1.2.1	Distribution statistique.....	206
4.3.2	Dispersion hydrodynamique.....	208
4.3.2.1	Analyse dans le plan (x,y).....	208
4.3.2.2	Analyse dans le plan (y,z).....	209
4.3.3	Discussion	211
4.3.3.1	Impact des propriétés de la ZNS sur le déplacement du traceur	211
4.3.3.2	Impact des propriétés de la ZNS sur la dispersion hydrodynamique.....	212
4.3.3.3	Interprétation des mécanismes de transfert	213
4.3.3.4	Intégration de l'hétérogénéité des faciès dans les modèles de prédiction.....	214
4.3.3.4.1	Rappel des observations terrain	214
4.3.3.4.2	Modèle conceptuel.....	215
4.3.4	Synthèse.....	216
5	CHAPITRE 5 : SYNTHESE ET PERSPECTIVES.....	218
5.1	SYNTHESE.....	218
5.1.1	Observations expérimentales	218
5.1.2	Etude multi-échelles des phénomènes hors équilibre physique dans la ZNS des calcaires de Beauce	220

5.1.3	<i>Recommandations techniques</i>	222
5.2	PERSPECTIVES	223
5.2.1	<i>Modélisation des courbes en régime transitoire avec un modèle MIM transitoire</i>	223
5.2.2	<i>Modélisation : limite d'une approche 1D</i>	224
5.2.3	<i>Modélisation : intégration dans les modèles globaux</i>	224
6	REFERENCES	227
7	ANNEXES	233
7.1	ANNEXES DU CHAPITRE 2	235
7.2	ANNEXES DU CHAPITRE 3	242

Tables des figures

FIGURE 1: LES TROIS PHASES DU SOL.....	27
FIGURE 2: EXEMPLE DE COURBE DE RETENTION EN EAU DU SOL (VAN GENUCHTEN ET AL., 1991) .	30
FIGURE 3: ORGANISATION DU CONTINUUM ZNS-ZS.....	32
FIGURE 4: EXEMPLE DE COURBE DE PERCEE (PROVENANT DE CETTE ETUDE).....	38
FIGURE 5: COURBES DE PERCEE EN CONCENTRATION RELATIVE CUMULEE EN FONCTION DU VOLUME D'EAU SORTIE ; A : EXPERIENCE ALORS QUE LA COLONNE EST SATUREE ; B : EXPERIENCE ALORS QUE LA COLONNE EST NON SATUREE (NIELSEN ET BIGGAR, 1961).....	39
FIGURE 6: ILLUSTRATION DES PROCESSUS DE TRANSPORT PREFERENTIEL A L'AIDE D'UN TRACEUR COLORE (DOUSSET ET AL., 2007).....	40
FIGURE 7: EFFET DE L'INTERRUPTION DE FLUX (1H) SUR LA COURBE DE PERCEE (BRUSSEAU ET AL., 1997)	41
FIGURE 8: MODELES CONCEPTUELS HORS-EQUILIBRE PHYSIQUE POUR L'ECOULEMENT DE L'EAU ET LE TRANSPORT DE SOLUTE (SIMUNEK ET VAN GENUCHTEN, 2008).....	42
FIGURE 9 : A- CARTE GEOLOGIQUE DE LA BEAUCE DU BRGM AU 1/1 000 000 ; B - LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE, CARTE ROUTIERE IGN AU 1/250 000 ; C- ZOOM SUR LA GEOLOGIE DU SITE, CARTE DU BRGM AU 1/50 000.....	51
FIGURE 10: PHOTOGRAPHIE DU CHAMP SUR LEQUEL EST REALISEE L'ETUDE SUR LE SITE DU LYCEE DE LA SAUSSAYE.	52
FIGURE 11: A- EVOLUTION DES TAUX DE NITRATE EN REGION CENTRE DEPUIS 1980 JUSQU'A 2008 ; B-CARTE DE TENEUR EN NITRATE DANS LES EAUX DE DISTRIBUTION EN 2012.....	53
FIGURE 12: EMPILEMENT STRATIGRAPHIQUE DES FORMATIONS DU CALCAIRE DE BEAUCE (SOURCE: BRGM).....	55
FIGURE 13 : CARTE HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE DE LA BEAUCE (SOURCE : BRGM).....	56
FIGURE 14: SUIVI DES CONCENTRATIONS EN NITRATE SUR LA ZONE D'ETUDE, (A) SUIVI DE LA CONCENTRATION EN NITRATE SUR LES Puits DU NORD DE LA ZONE D'ETUDE, (B) CARTE DE LOCALISATION DES Puits, (C) SUIVI DE LA CONCENTRATION EN NITRATE DANS LES Puits DU SUD DE LA ZONE D'ETUDE (DEDEWANOU ET AL., 2015B).....	58
FIGURE 15: SCHEMA DE PRINCIPE DECRIVANT LE PROTOCOLE DE PRELEVEMENT.	60
FIGURE 16: (A) SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL, (B) PHOTOGRAPHIE DU DISPOSITIF EN LABORATOIRE.....	61
FIGURE 17: (A) SIMULATEUR DE PLUIE, (B) MAILLAGE HEXAGONAL, (C) AIGUILLES HYPODERMIQUES.....	62
FIGURE 18: STRUCTURE MOLECULAIRE DES FLUOROBENZOATES PFBA ET 2,6-DFBA, MODIFIE DE BOWMAN ET GIBBONS (1992).....	63
FIGURE 19 : CHROMATOGRAMME DE LA CALIBRATION MULTI-TRACEURS (DFBA, PFBA, BR) ET D'UN POLLUANT NATURELLEMENT PRESENT (NITRATE)	65
FIGURE 20: COURBE DE CALIBRATION (AIRE-CONCENTRATION) POUR LES TROIS TRACEURS (DFBA, PFBA, BR-).....	65
FIGURE 21: PREPARATION DE LA BASE DE LA COLONNE (COLONNE 3), (A) BASE DE LA COLONNE SANS BILLES DE VERRE, (B) BASE DE LA COLONNE REMPLIE DE BILLES DE VERRE.....	67

FIGURE 22: RECURRENCE DE PRECIPITATION A CHARTRES POUR 3 INTENSITES DE PRECIPITATION (> 1MM, >5MM, >10MM) POUR L'ANNEE 2014. (SOURCE : WWW.INFOCLIMAT.FR).....	68
FIGURE 23 : PROTOCOLE D'INJECTION POUR LA REALISATION DES EXPERIENCES REGIME PERMANENT POUR LES TROIS INTENSITES DE PRECIPITATION (4 MM/H, 8 MM/H, ET 16 MM/H).	69
FIGURE 24: PROTOCOLE D'INJECTION POUR LA REALISATION DES REGIMES TRANSITOIRES AVEC INTERRUPTION DE FLUX.....	70
FIGURE 25: PROTOCOLE D'INJECTION POUR LA REALISATION DES REGIMES TRANSITOIRES DE DRAINAGE.....	71
FIGURE 26: FORMULE DE LA MOLECULE DE BLEU BRILLANT (E133).....	73
FIGURE 27: PHOTOGRAPHIE DE LA REALISATION DU PROTOCOLE DE DECOUPE DES COLONNES.....	74
FIGURE 28: (A) PHOTOGRAPHIE DU PLAN D'ECHANTILLONNAGE DANS LA COLONNE (8) LORS DU PROTOCOLE DE DECOUPE ; (B) PRELEVEMENT DANS LA COLONNE (8).....	75
FIGURE 29: COURBE DE CALIBRATION (ABSORBANCE-CONCENTRATION) DE LA METHODE DE DOSAGE PAR SPECTROCOLORIMETRIE.	76
FIGURE 30: METHODOLOGIE DU TRAITEMENT D'IMAGE POUR LE SUIVI DU BLEU BRILLANT.....	79
FIGURE 31 : PRELEVEMENT DES EAUX DE LA ZONE NON SATUREE A L'AIDE DE BOUGIES POREUSES	83
FIGURE 32: TEMPS T_0 APRES L'INJECTION DE BLEU BRILLANT SUR L'ENSEMBLE DE LA SURFACE....	86
FIGURE 33: PROTOCOLE DE DECOUPE DE LA FOSSE (GAUCHE), CLICHES BRUTS OBTENUS POUR LES DIFFERENTS PROFILS (0, 33, 66, 100 CM) (DROITE).....	87
FIGURE 34: PHOTOGRAPHIE DE LA DISPOSITION DE L'EXPERIENCE LORS DE DECOUPE DE LA FOSSE	88
FIGURE 35: COURBE DE PERCEE AJUSTEE A L'EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°1 SUR LA COLONNE 6 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER1).	94
FIGURE 36: COURBE DE PERCEE AJUSTEE A L'EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°2 SUR LA COLONNE 6 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER2).	95
FIGURE 37: COURBE DE PERCEE AJUSTEE A L'EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°3 SUR LA COLONNE 6 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER3).	96
FIGURE 38: COURBE DE PERCEE AJUSTEE A L'EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°1 SUR LA COLONNE 8 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER1).	100
FIGURE 39: COURBE DE PERCEE AJUSTEE A L'EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN	

BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°2 SUR LA COLONNE 8 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER2).	101
FIGURE 40: COURBE DE PERCEE AJUSTEE A L'EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°3 SUR LA COLONNE 8 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER3).	102
FIGURE 41: COMPORTEMENT DES TRACEURS DFBA ET BROMURE LORS DE TROIS EXPERIENCES EN REGIME PERMANENT.....	105
FIGURE 42 : PROFIL DE POTENTIEL ET CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DANS LA COLONNE 6 POUR L'ENSEMBLE DES EXPERIENCES EN REGIME PERMANENT.....	107
FIGURE 43: PROFIL DE POTENTIEL ET CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DANS LA COLONNE 8 POUR L'ENSEMBLE DES EXPERIENCES EN REGIME PERMANENT.....	109
FIGURE 44 : COURBES DE PERCEES ET AJUSTEMENT POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIES.....	113
FIGURE 45: COURBES DE PERCEES DE LA COLONNE 3 POUR LA FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H).	114
FIGURE 46: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION AVEC INTERRUPTION DE FLUX N°1 DE COLONNE 6 A INTENSITE DE PRECIPITATION MOYENNE (4 MM/H) (COL6INT4MMH).	119
FIGURE 47: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION AVEC INTERRUPTION DE FLUX N°2 DE COLONNE 6 A INTENSITE DE PRECIPITATION MOYENNE (8 MM/H) (COL6INT8MMH).	120
FIGURE 48: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°1 DE COLONNE 8 A INTENSITE DE PRECIPITATION MOYENNE (4 MM/H) EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX (COL8INT4MMH).....	122
FIGURE 49: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°1 DE COLONNE 8 A INTENSITE DE PRECIPITATION MOYENNE (8 MM/H) EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX (COL8INT8MMH).....	123
FIGURE 50: SUIVI DU POTENTIEL TOTAL SUR LES PHASES D'INTERRUPTION DE FLUX SUR LA COLONNE 6 ET 8 POUR 4 ET 8 MM/H	126
FIGURE 51 : COURBES DE PERCEE EN REGIME PERMANENT ET EN REGIME TRANSITOIRE POUR LA COLONNE 6 ET LA COLONNE 8.....	127
FIGURE 52: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°1 DE COLONNE 6 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	131
FIGURE 53: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°2 DE COLONNE 6 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	132

FIGURE 54: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°3 DE COLONNE 6 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	134
FIGURE 55: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°4 DE COLONNE 6 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	135
FIGURE 56: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°1 DE COLONNE 8 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	137
FIGURE 57: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°2 DE COLONNE 8 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	138
FIGURE 58: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°3 DE COLONNE 8 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	140
FIGURE 59: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°4 DE COLONNE 8 EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE.	141
FIGURE 60: EVOLUTION DU POTENTIEL TOTAL AU COURS DES PHASES DE DRAINAGE DE LA COLONNE 6.....	143
FIGURE 61: EVOLUTION DU POTENTIEL TOTAL AU COURS DES PHASES DE DRAINAGE DE LA COLONNE 8.....	144
FIGURE 62 : ESTIMATION DE K(H) A LA PROFONDEUR MOYENNE (15 CM) DE LA COLONNE 6.	145
FIGURE 63: ESTIMATION DE K(H) A LA PROFONDEUR MOYENNE (15 CM) DE LA COLONNE 8	146
FIGURE 64: COURBE DE PERCEE EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE POUR LES QUATRE EXPERIENCES DE DRAINAGE DE LA COLONNE 6.....	148
FIGURE 65: COURBE DE PERCEE EN REGIME TRANSITOIRE D'INTERRUPTION DE FLUX AVEC DRAINAGE POUR LES QUATRE EXPERIENCES DE DRAINAGE DE LA COLONNE 8.....	149
FIGURE 66: COURBE DE PERCEE DU TRACEUR C ₁ (PFBA) APRES UNE PHASE DE DRAINAGE ET UNE REPRISE DU FLUX A 4 MM/H.....	151
FIGURE 67: COURBE DE PERCEE DU TRACEUR C ₁ (PFBA) APRES UNE PHASE DE DRAINAGE ET UNE REPRISE DU FLUX A 8 MM/H.....	151
FIGURE 68: COURBE DE PERCEE DU TRACEUR C ₁ (PFBA) APRES UNE PHASE DE DRAINAGE ET UNE REPRISE DU FLUX A 4 MM/H.....	152
FIGURE 69: COURBE DE PERCEE DU TRACEUR C ₁ (PFBA) APRES UNE PHASE DE DRAINAGE ET UNE REPRISE DU FLUX A 8 MM/H.....	152
FIGURE 70: COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION FINALE DU BLEU BRILLANT DANS LA COLONNE 6.	156
FIGURE 71: LA COURBE DE PERCEE (EN HAUT) ET LE SUIVI DU DEBIT, DE LA PRESSION MATRICIELLE ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION FINALE DE DECOUPE DE COLONNE 8.....	158

FIGURE 72: MOSAÏQUE D'IMAGE DES 176 MACROPHOTOGRAPHIES POUR LA COLONNE 6.....	162
FIGURE 73 : CARTOGRAPHIE DU BLEU BRILLANT SUR LE POURTOUR DE LA COLONNE 6 AVANT LE PROTOCOLE DE DECOUPE.....	162
FIGURE 74: PHOTOGRAPHIE ET CARTOGRAPHIE DU BLEU BRILLANT ET DESCRIPTION LITHOLOGIQUE POUR LA COLONNE 6.....	163
FIGURE 75: MOSAÏQUE D'IMAGE DES 176 MACROPHOTOGRAPHIES POUR LA COLONNE 8.....	165
FIGURE 76 : CARTOGRAPHIE DU BLEU BRILLANT SUR LE POURTOUR DE LA COLONNE 8 AVANT LE PROTOCOLE DE DECOUPE.....	165
FIGURE 77: PHOTOGRAPHIE ET CARTOGRAPHIE DU BLEU BRILLANT AINSI QUE LA DESCRIPTION LITHOLOGIQUE POUR LA COLONNE 8.....	166
FIGURE 78: GRANULOMETRIE DES COUCHES DE LA COLONNE 6 AU MOMENT DE LA DECOUPE DE LA COLONNE	167
FIGURE 79: GRANULOMETRIE DES COUCHES DE LA COLONNE 8 AU MOMENT DE LA DECOUPE DE LA COLONNE	168
FIGURE 80: PHOTOGRAPHIE DE LA GROSSIERETE DU MATERIAU DE LA COLONNE 8 AU MOMENT DE LA DECOUPE ; (A) PHOTOGRAPHIE DE LA SURFACE DE DECOUPE A 6 CM DE LA COUCHE (6-12 CM) ; (B) PHOTOGRAPHIE DE LA SURFACE DE LA DECOUPE A 24 CM.....	169
FIGURE 81 : OBSERVATION DE LA STRUCTURE DU CALCAIRE EN LIEN AVEC LES LITHOLOGIES OBSERVEES LORS DE LA DECOUPE.....	172
FIGURE 82: ESTIMATION DU KS A PARTIR DE TESTS DE PERMEABILITE A CHARGE VARIABLE.	175
FIGURE 83: COURBE DE RETENTION EN EAU MOYENNE AVEC L'ENSEMBLE DES POINTS DE MESURE POUR LES 10 ECHANTILLONS POUR CHAQUE POTENTIEL MATRICIEL.....	176
FIGURE 84: INFLUENCE DES BILLES DE VERRE SUR LA COURBE DE PERCEE, LA TENEUR EN EAU, ET LE POTENTIEL MATRICIEL, ETUDE SUR LA COLONNE 8.....	181
FIGURE 85: IMPACT DE LA PRISE EN COMPTE DES BILLES DE VERRES DANS LA REPRODUTIBILITE DES COURBES DE PERCEE A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION.....	183
FIGURE 86: VARIABILITE DU KS POUR LA COLONNE 6 AVEC ET SANS BILLE DE VERRE (PARAMETRE D'AJUSTEMENT 1).....	184
FIGURE 87: POINTS EXPERIMENTAUX DE COURBE $\theta(H)$ POUR LA COLONNE 6 AVEC LES COUPLES DE VALEURS DE TENEUR EN EAU ET DE POTENTIEL MATRICIEL POUR CHAQUE REGIME PERMANENT.....	186
FIGURE 88: POINTS EXPERIMENTAUX DE COURBE $\theta(H)$ POUR LA COLONNE 8 AVEC LES COUPLES DE VALEURS DE TENEUR EN EAU ET DE POTENTIEL MATRICIEL POUR CHAQUE REGIME PERMANENT.....	187
FIGURE 89: HETEROGENEITE DES FACIES DU CALCAIRE DE BEAUCE SUR LA FOSSE ETUDIEE	192
FIGURE 90: COURBE DE DISTRIBUTION DES PORES OBTENUS PAR ANALYSE AU PROSIMETRE A MERCURE.....	194
FIGURE 91: SUIVI DE LA CONCENTRATION EN ION BROMURE DANS LES ECHANTILLONS DE LA SOLUTION RECUPERES A L'AIDE DES BOUGIES POREUSES.....	198
FIGURE 92: CONCENTRATION EN BROMURE ET AJUSTEMENT AU MODELE CDE OU MIM.....	200
FIGURE 93: ENSEMBLE DES COURBES DE RESTITUTION OBTENUES A PARTIR DES 6 BOUGIES POREUSES.....	201

FIGURE 94: CARTOGRAPHIE DU BLEU BRILLANT POUR TOUS LES PROFILS.....	205
FIGURE 95 : STATISTIQUES DE DISTRIBUTION DES ECOULEMENTS	207
FIGURE 96: COUVERTURE DE BLEU BRILLANT SUR L'ENSEMBLE DE CHAQUE PROFIL ET PAR MINI- COLONNE DE 25 CM DE LARGE POUR CHAQUE PROFIL EN LIEN AVEC LES LITHOLOGIES	210
FIGURE 97: HISTOGRAMME DE DISTRIBUTION DU MAXIMUM DE RECOUVREMENT DE BLEU BRILLANT EN FONCTION DE LA DISTANCE (Y) AU BORD DE LA FOSSE. LA LITHOLOGIE PRINCIPALE CONTENANT CE MAXIMUM (ET LA LITHOLOGIE SECONDAIRE SI CELLE-CI EST PRESENTE)	211
FIGURE 98 : MODELE CONCEPTUEL DE L'INTEGRATION DES FACIES DANS UN MODELE GLOBAL DE VULNERABILITE DE LA RESSOURCE EN EAU	216

Tables des tableaux

TABEAU 1: COLONNES NON PERTURBEES PRELEVEES SUR LE SITE DU LYCEE DE SAUSSAYE	59
TABEAU 2: PARAMETRES ADIMENSIONNELLES POUR L'EQUATION DE CONVECTION DISPERSION	72
TABEAU 3: PARAMETRES ADIMENSIONNELLES POUR LE MODELE DE TRANSPORT MIM	73
TABEAU 4 : CARACTERISATION LITHOLOGIQUES DES POINTS DE PRELEVEMENT	84
TABEAU 5: RESUME DES GRANDEURS SUIVIES DURANT LES EXPERIENCES D'ELUTION DE LA COLONNE 6 POUR UNE FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H)	93
TABEAU 6: RESUME DES GRANDEURS SUIVIES DURANT LES EXPERIENCES D'ELUTION DE LA COLONNE 6 POUR UNE INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H)	97
TABEAU 7: RESUME DES GRANDEURS SUIVI DURANT LES EXPERIENCES D'ELUTION DE LA COLONNE 6 POUR UNE FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H)	97
TABEAU 8: RESUME DES GRANDEURS SUIVI DURANT LES EXPERIENCES D'ELUTION DE LA COLONNE 8 POUR UNE FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H)	99
TABEAU 9: RESUME DES GRANDEURS SUIVI DURANT LES EXPERIENCES D'ELUTION DE LA COLONNE 8 POUR UNE INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H)	103
TABEAU 10: RESUME DES GRANDEURS SUIVI DURANT LES EXPERIENCES D'ELUTION DE LA COLONNE 8 POUR UNE FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H)	103
TABEAU 11: RESUME DES GRANDEURS SUIVI DURANT LES EXPERIENCES D'ELUTION DE LA COLONNE 3 POUR UNE FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H)	104
TABEAU 12: ESTIMATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES POUR LA COLONNE 6	115
TABEAU 13: ESTIMATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES POUR LA COLONNE 8	116
TABEAU 14: ESTIMATION DE LA VALIDITE DES MESURES DES TENEURS EN EAU REALISEES PAR LES SONDES PAR SUIVI DU DEBIT ET PAR SECHAGE DE LA COLONNE 6.	157
TABEAU 15: ESTIMATION DE LA VALIDITE DES MESURES DES TENEURS EN EAU REALISEES PAR LES SONDES PAR SUIVI DU DEBIT ET PAR SECHAGE DE LA COLONNE 8.	159
TABEAU 16: POROSITE DES DIFFERENTES LITHOLOGIES OBSERVEES DANS LES DIFFERENTES COUCHES DE LA COLONNE 6.	170
TABEAU 17: POROSITE DE LA COLONNE 8 SUR LES 5 COUCHES POUR DIFFERENTES LITHOLOGIES PRESENTE DANS LA COUCHE	170
TABEAU 18: PARAMETRES DES BILLES DE VERRE POUR DEUX AJUSTEMENTS	176
TABEAU 19: PARAMETRES D'AJUSTEMENT DE LA COURBE $\theta(H)$ POUR LES CYLINDRES DE LA COLONNE 6	177
TABEAU 20: PARAMETRES D'AJUSTEMENT DE LA COURBE $\theta(H)$ POUR LES CYLINDRES DE LA COLONNE 8	177
TABEAU 21: GAMME DE VARIATION DE K_S (CM/MIN) SUR LE DOUBLE AJUSTEMENT POUR LA COLONNE 6	177
TABEAU 22: GAMME DE VARIATION DE K_S (CM/MIN) SUR LE DOUBLE AJUSTEMENT DE LA COLONNE 8	178
TABEAU 23: OPTIMISATION DU K_S SUR LA COURBE DE RECESSION DU DEBIT POUR LA COLONNE 6	178
TABEAU 24: OPTIMISATION DU K_S SUR LA COURBE DE RECESSION DU DEBIT POUR LA COLONNE 8	179
TABEAU 25: CARACTERISATION DES LITHOLOGIES AU MOYEN DE L'INFILTROMETRIE A DISQUE, DU POROSIMETRE A MERCURE ET DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE	194
TABEAU 26 : ESTIMATION DES PARAMETRES DE TRANSPORT A PARTIR DES AJUSTEMENTS STANMOD SUR LES COURBES DE RESTITUTIONS SUR LE TERRAIN.	202
TABEAU 27 : STATISTIQUES DE RECOUVREMENT DU BLEU BRILLANT	208

1 Chapitre 1 : Introduction

1.1 Introduction générale

1.1.1 Contexte de l'étude

La pollution des eaux souterraines par les nitrates touche une grande partie du territoire national et européen. Cette pollution a débuté à la fin des années 1950 avec la mise en place de l'agriculture intensive. La généralisation de ces pratiques a fortement augmenté la productivité agricole dans toute l'Europe. L'ajout de fertilisants, dont les nitrates, s'accompagne cependant de pertes sous la zone d'exploitation par les systèmes racinaires des cultures. Ces pertes sont assez importantes pour engendrer des teneurs en nitrate élevées dans les eaux drainées à la base du sol et provoquer une contamination des eaux souterraines.

En France, on estime que l'agriculture est responsable à hauteur de 66 % des concentrations en nitrate contre 22 % pour les rejets des collectivités locales et 12 % pour l'industrie (Maget et Pointet, 2006). Les zones les plus touchées sont les grandes plaines céréalières, la Bretagne, le Grand-Est, Le Centre-Val de Loire, la Nouvelle Aquitaine et l'Île-de-France. Dans ces régions, les teneurs en nitrate dépassent régulièrement la norme de 50 mg/L fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé. L'une des ressources en eau souterraine les plus touchées en France est l'aquifère des Calcaires de Beauce, dont le volume de stockage est estimé proche de 20 Mm³. Il s'agit du plus grand aquifère de France. La région agricole de Beauce représente 13 % de la production céréalière nationale.

La cartographie de 1984 (Seguin, 1987) et le suivi des teneurs en nitrate depuis 35 ans montrent une constante augmentation des teneurs en nitrate de l'aquifère des Calcaires de Beauce, le seuil de 50 mg/L étant largement dépassé dans la plupart des forages (Binet et al., 2016). Sur la commune de Chartres, le dépassement de la norme de 50 mg/L (Pillet et Guilbaud, 2013 ; Dedewanou et al., 2015b) oblige les collectivités territoriales à mixer l'eau

provenant de différents forages pour abaisser la teneur en nitrate en dessous du seuil de potabilité et rendre l'eau pompée propre à la consommation humaine.

Depuis les années 1980, le Ministère de l'Agriculture et le Secrétariat d'Etat à l'Environnement ont mis en place le CORPEN (Comité d'orientation pour la réduction de la pollution en eaux par les nitrates et les phosphates), sur la base des recommandations du rapport Hénin visant à améliorer les pratiques agricoles (Hénin, 1980). Ces recommandations portant sur les bonnes pratiques agricoles ont été reprises dans la politique européenne de gestion environnementale (Directive « Nitrate » de 1992). Plus récemment, la directive cadre européenne sur l'eau reprend les problématiques de potabilité de l'eau sur les grands bassins hydrologiques européens.

Pour répondre aux exigences de la directive cadre sur l'eau, la loi a renforcé les dispositifs de maîtrise des pollutions diffuses, par la création des zones de protection des aires d'alimentation des captages d'eau potable. Des approches stochastiques, utilisant des Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont généralement utilisées pour définir des zones à risques (Dedewanou et al., 2015a). Ces approches sont basées sur des critères qualitatifs (occupation des sols) et ne permettent pas de produire des scénarii d'évolution quantitative des pollutions diffuses et de leurs impacts sur la qualité des eaux souterraines (Schnebelen, 2000). Les relations entre les quantités de produits épandus à la surface des sols, la quantité de nitrate utilisé selon les cultures (Schnebelen et al., 2004), leurs temps de transfert et leurs concentrations résiduelles aux captages peuvent être établies en appliquant les lois de transport classiques telles que rencontrées dans des modèles déterministes mécanistes tel que MACRO (Larsson et Jarvis, 1999).

Ce type de modèles décrit le plus précisément possible les processus physiques qui interviennent lors du transfert. Ils peuvent décrire des processus hors équilibre comme des dispersions hétérogènes des solutés, des phases d'eau mobile et eau immobile avec la possibilité d'échanges entre ces deux phases. Mais ces modèles mécanistes sont complexes à mettre en

œuvre et nécessitent de connaître un grand nombre de paramètres difficiles à obtenir expérimentalement (Vauclin, 1994). L'un des paramètres les plus complexes à obtenir est la courbe de conductivité hydraulique en fonction de la teneur en eau $K(\theta)$, qui est elle-même liée à la courbe de teneur en eau en fonction du potentiel matriciel $\theta(h)$ (van Genuchten, 1980). Le forme de cette dernière est liée à l'hétérogénéité du milieu (Durner, 1994) et les procédures d'estimation sont nombreuses (Köhne et al., 2002 ; Gerke et Köhne, 2002). Des techniques sur le terrain d'infiltrométrie à disque (Coquet et al., 2000) permettent d'obtenir une information parcellaire de la courbe de $K(h)$. Les courbes ($K(h)$ et $\theta(h)$) peuvent être obtenues par ajustement d'un modèle d'écoulement à des données expérimentales d'élution acquises en laboratoire en utilisant des procédures d'optimisation (Simunek et al., 2011). Logsdon (2002) propose une revue des techniques de mesure en laboratoire et des techniques d'optimisation pour obtenir, en autres, les courbes $K(h)$ et $\theta(h)$.

Outre la difficulté d'acquisition de certains paramètres qui s'apparentent aux propriétés du milieu, des problèmes paramétriques liés au modèle d'écoulement utilisé peuvent également survenir lors de processus d'optimisation. Plusieurs paramètres peuvent être inter-dépendants et engendrer une grande incertitude leur estimation (Bajracharya et Barry, 1997 ; Vanderborght et al., 1997).

Pour prédire les taux de nitrate au puits et afin d'alimenter ces modèles gourmands en paramètres, des études expérimentales (traçages, études en cases lysimétriques) sont pratiquées sur les premiers décimètres de sol, les plus facilement accessibles. Ces études détaillées permettent une bonne connaissance des phénomènes de transfert des polluants. Plusieurs auteurs ont mis en évidence des processus de transport préférentiel, tels que les écoulements à travers les macropores, les phénomènes de digitation ou plus généralement des processus hors équilibre (van Genuchten and Wierenga, 1976 ; Brusseau, 1992 ; Jarvis, 1998). Le transport préférentiel est défini par Hendrickx et Flury (2001) comme étant tous les phénomènes où l'eau et le

soluté se déplacent le long de certains chemins, tout en contournant une fraction de la matrice poreuse. Ces processus, difficiles à prévoir, engendrent une hétérogénéité des vitesses de transfert des polluants dans le sol et la zone non saturée (ZNS) vers la nappe.

Pour parvenir jusqu'à la nappe, le soluté doit traverser une zone dont la porosité n'est pas entièrement remplie d'eau, il s'agit de la zone non saturée (ZNS). Cette zone est constituée du sol, présent dans les premiers décimètres sous la surface, et, en dessous, de la ZNS intermédiaire (aussi appelé par abus de langage ZNS), constituée de la matrice rocheuse non saturée en eau. La profondeur de cette zone demande beaucoup de moyens pour l'atteindre et de l'étudier.

Actuellement, les modèles globaux les plus complexes souffrent d'une absence de connaissances sur les processus de transport et sur les valeurs de vitesse et de dispersion hydrodynamique des solutés dans la ZNS. Des études sur le terrain ont permis de mettre en évidence des phénomènes hors équilibre physique dans les premiers centimètres de la ZNS des Calcaires de Beauce (Alletto et al., 2006 ; Coquet et al., 2007). De plus, la ZNS des Calcaires de Beauce peut faire jusqu'à 20 m de profondeur et présente une forte hétérogénéité (Schnebelen et al., 1999). La présence avérée de phénomènes hors équilibre et la dimension importante de la ZNS, rend cette zone particulièrement difficile à comprendre et à modéliser du point de vue du transfert des solutés vers la nappe.

A l'aide d'expériences en laboratoire, plusieurs auteurs ont discuté de l'influence de l'état hydrique initial (plus précisément la teneur en eau) du sol sur l'occurrence et la favorabilité des phénomènes hors équilibre (While et al., 1986 ; Clothier and Green, 1994). Köhne et al. (2004) montrent que les états hydriques extrêmes engendrent plus de phénomènes hors équilibre que les états hydriques intermédiaires. Les états hydriques extrêmes engendrant des phénomènes hors équilibre sont donc plus susceptibles d'apparaître en régime transitoire.

1.1.2 Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'étudier les phénomènes de transfert hors équilibre physique dans la ZNS des Calcaires de Beauce, en répondant aux questions suivantes :

- La ZNS (plus profonde de l'horizon C des profils de sol) est-elle sujette à des phénomènes de transport hors équilibre physique ?
- Quels sont les effets du régime hydrique sur les phénomènes de transport hors équilibre et sur les vitesses de transfert ?

Cette étude est une contribution à la modélisation globale de la vulnérabilité quantitative des ressources en eau dans la région de la Beauce. A ce titre, nous cherchons à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les valeurs de vitesse et de dispersion hydrodynamique dans la ZNS des Calcaires de Beauce ?
- Comment intégrer des phénomènes hors équilibre dans les approches de modélisation de façon pratique et accessible ?

1.1.3 Structure de la thèse

Le premier chapitre de cette étude est destiné à rappeler les concepts de base utiles à la compréhension du travail de recherche présenté dans ce document, ainsi que les avancées scientifiques dans le domaine.

Le second chapitre présente le contexte de la région de la Beauce. Il s'agit par la suite de décrire les outils méthodologiques qui seront utilisés dans cette étude, et particulièrement la mise en place d'expériences d'élution sur colonnes et les protocoles de traçage réalisés *in situ* sur la commune de Chartres.

Le chapitre trois est consacré à l'ensemble des résultats issus de l'expérimentation en laboratoire, tout d'abord en présentant les résultats obtenus en régime permanent, puis en régime transitoire. Le milieu du chapitre présente une description détaillée des colonnes utilisées pour les éluions. La fin du chapitre est consacrée à la modélisation de l'impact des

billes de verre situées à la base de la colonne sur la simulation des courbes de percée.

Le chapitre quatre présente les résultats obtenus sur le terrain, discute de la validité des valeurs de vitesse et de dispersion hydrodynamique obtenues en laboratoire, ainsi que de l'intégration des mécanismes d'écoulement observés dans des modèles plus globaux.

Le dernier chapitre présente la synthèse des résultats et les perspectives de ce travail de recherche.

1.2 Concepts de base

1.2.1 Physique de l'eau dans le sol et la ZNS

1.2.1.1 Les trois phases du sol

Le sol est un milieu complexe issu de l'agencement de particules solides. Les interstices entre les particules donnent naissance à des espaces, aussi appelés « pores ». L'entité rassemblant et reliant les pores les uns aux autres s'appelle le « réseau poral ». Celui-ci peut être le réceptacle d'une phase liquide et/ou d'une phase gazeuse.

Le sol peut-être schématisé de la façon suivante :

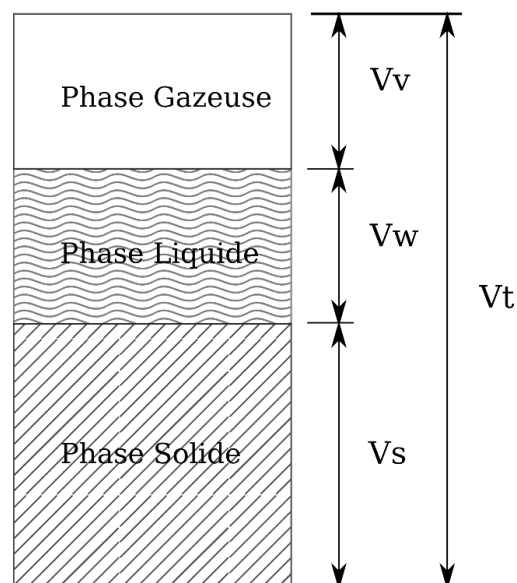


Figure 1: Les trois phases du sol

Le volume total d'un sol (V_t) est la somme du volume des trois phases qui le composent (V_v , V_w , V_s)

$$V_t = V_v + V_w + V_s \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

- V_t [L^3] est le volume total de sol,
- V_v [L^3], le volume de la phase gazeuse,
- V_w [L^3], le volume de la phase liquide,
- V_s [L^3] le volume de la phase solide.

1.2.1.2 La porosité

L'ensemble des pores s'appelle la « porosité ». Le volume de la porosité (V_ϕ) est donc égal à la somme des volumes des phases liquide et gazeuse qui l'occupent :

$$V_\phi = V_w + V_v \quad (\text{Eq. 2})$$

La porosité d'un matériau peut s'exprimer par le pourcentage de pores dans le volume total du matériau :

$$\phi = \frac{V_\phi}{V_t} \quad (\text{Eq. 3})$$

1.2.1.3 La masse volumique apparente

De la même manière, la masse du sol peut se décomposer en la somme des masses des phases qui la composent :

$$M_t = M_v + M_w + M_s \quad (\text{Eq. 4})$$

La masse de la phase gazeuse (M_v) est considérée comme nulle. Donc :

$$M_t = M_w + M_s \quad (\text{Eq. 5})$$

La masse volumique apparente permet de rendre compte de la masse de sol dans un volume donné. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$\rho_b = \frac{M_t}{V_t} \quad (\text{Eq. 6})$$

1.2.1.4 L'état hydrique

L'eau dans le sol peut être décrite par deux grandeurs physiques :

1.2.1.4.1 Teneur en eau

Il s'agit de la quantité d'eau dans le sol par rapport à la quantité de sol. Elle peut s'exprimer en teneur en eau gravimétrique (W) :

$$W = \frac{M_w}{M_s} \quad (\text{Eq. 7})$$

Ou en teneur en eau volumique (θ) :

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (\text{Eq. 8})$$

Cette dernière expression sera privilégiée dans la suite de cette étude.

1.2.1.4.2 Potentiel hydrique (ψ)

Le potentiel hydrique du sol traduit l'état énergétique de l'eau dans le sol ou (au signe près) la quantité d'énergie qu'il faudrait fournir pour l'extraire du sol.

Le potentiel de l'eau dans le sol comprend plusieurs composantes, chacune liée à une force agissant sur l'eau, modifiant son état énergétique par rapport à une eau pure et libre :

$$\psi_t = \psi_g + \psi_s \text{ ou } \psi_m + \psi_o \quad (\text{Eq. 9})$$

- ψ_t : potentiel total
- ψ_g : potentiel gravitationnel
- ψ_s : potentiel de submersion (la pression de l'eau en milieu saturé)

- ψ_m : potentiel matriciel (attraction de l'eau par la matrice solide en milieu non saturé)
- ψ_o : potentiel osmotique (liée à la présence de sels).

Le potentiel osmotique est négligeable face aux autres forces. Il est fréquent que les forces de gravité, matricielle ou de submersion soient les seules à agir. Dans notre étude, nous parlerons uniquement de potentiel total (ou potentiel hydrique) pour décrire l'état hydrique du sol :

$$\psi_t = \psi_m + \psi_g \quad (\text{Eq. 10})$$

Le potentiel matriciel peut atteindre des valeurs très négatives. On privilégie alors la notion de pF, qui se définit comme le log décimal de la valeur absolue de ψ_m exprimée en cm (noté alors h) :

$$pF = \log |h| \quad (\text{Eq. 11})$$

1.2.1.4.3 Courbe de rétention en eau

La teneur en eau et le potentiel matriciel peuvent être mis en relation au travers d'une courbe de rétention en eau, $\theta(h)$ (Figure 2).

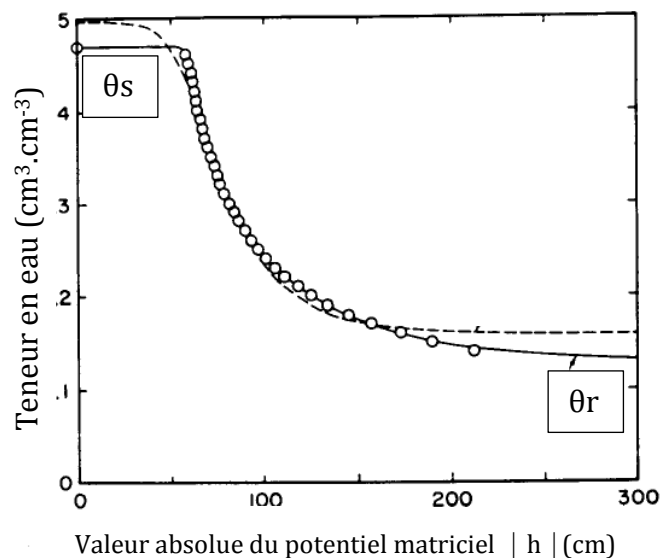


Figure 2: Exemple de courbe de rétention en eau du sol (van Genuchten et al., 1991)

Dans son papier de 1980, van Genuchten reproduit la forme en S de la fonction de rétention à l'aide de l'équation suivante, qui est devenu à ce jour le modèle de fonction de rétention le plus utilisé :

$$S_e = [1 + (-\alpha h_m)^n]^{-m} \quad (\text{Eq. 12})$$

ou α [L^{-1}] est un paramètre ($\alpha > 0$) qui ajuste le point d'inflexion de la courbe $\theta(h)$, et n et m sont des paramètres de forme liés par la relation.

$$m = 1 - 1/n \quad (\text{Eq. 13})$$

1.2.2 Les transferts d'eau et de solutés dans le continuum ZNS-ZS

1.2.2.1 Le continuum ZNS-ZS

On distingue traditionnellement les écoulements en milieu saturé (généralement tridimensionnels) des écoulements en milieu non saturé (généralement monodimensionnels et verticaux). La zone saturée se définit par une porosité entièrement remplie d'eau. L'expression des mécanismes d'écoulement à l'aide d'équations mathématiques est relativement simple, puisqu'il n'y a que deux phases à prendre en compte (le solide et le liquide). La zone non saturée qui se compose du sol et de la zone non saturée intermédiaire (Figure 3), se définit par une porosité partiellement remplie d'eau. Le problème est donc plus complexe puisqu'il met en jeu trois phases (le solide, le liquide et le gaz).

Différents modèles sont utilisés pour décrire les écoulements dans la ZNS et ceux dans la ZS, afin de tenir compte des spécificités des processus qui s'y déroulent.

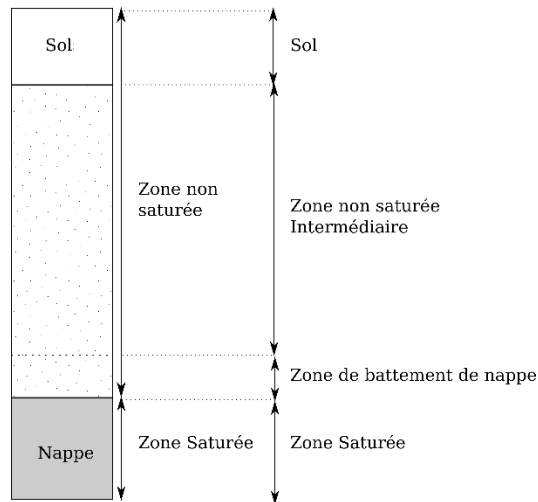


Figure 3: Organisation du continuum ZNS-ZS

1.2.2.2 Ecoulements en milieu saturé : La loi de Darcy

L'expression de l'écoulement en milieu saturé en régime permanent la plus courante est celle développée par Darcy:

$$Q = K_s \cdot A \cdot i \quad (\text{Eq. 14})$$

- Q [L^3/T] est le débit
- K_s [L/T] est la conductivité hydraulique à saturation
- A [L^2] est la section d'écoulement
- i [-] est le gradient de charge

Pour une section unitaire, l'expression de l'écoulement devient :

$$J_w = -K_s \cdot i \quad (\text{Eq. 15})$$

- J_w [L/T] est la densité de flux (flux par unité de surface de la section d'écoulement par unité de temps).

1.2.2.3 Ecoulements en milieu non saturé: La Loi de Buckingham-Darcy

En 1907, Buckingham propose une modification de la loi de Darcy pour l'appliquer dans les cas d'écoulements en milieu non saturé, en posant deux hypothèses :

- la force motrice de l'écoulement est la somme du potentiel matriciel et du potentiel gravitationnel,

- la conductivité hydraulique d'un sol non saturé est fonction de la teneur en eau ou du potentiel matriciel du sol.

L'expression de Darcy modifiée par Buckingham devient :

$$J_w = -K(h) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right) \quad (\text{Eq. 16})$$

1.2.2.4 Ecoulements en régime transitoire

1.2.2.4.1 Equation de conservation de l'eau

En régime transitoire, le potentiel matriciel et la teneur en eau varient dans le temps et l'espace tout comme le flux. La description d'un écoulement en régime transitoire nécessite de décrire les gains et les pertes d'eau dans un volume unitaire par unité de temps. Il s'agit de l'équation de conservation de l'eau :

Pour Δt :

$$\begin{aligned} & \text{volume d'eau entré dans le volume unitaire} \\ &= \text{volume d'eau sortie du volume unitaire} \\ &+ \text{volume d'eau stocké dans le volume unitaire} \\ &+ \text{volume d'eau extrait du volume unitaire par les plantes} \end{aligned}$$

Dans le cas d'un écoulement vertical, l'équation de conservation de l'eau (ou le bilan de masse) est de la forme :

$$\frac{\partial J_w}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} + r_w = 0 \quad (\text{Eq. 17})$$

1.2.2.4.2 L'équation de Richards

L'équation de conservation prend en compte les flux d'eau, les variations du stockage, les effets de sources et de puits d'eau éventuels. Lorsque cette équation est combinée avec la loi de Buckingham $J_w = -K(h) \left(\frac{dh}{dz} + 1 \right)$ (Eq. 16), il est alors possible de prédire la teneur en eau ou le potentiel matriciel dans le sol durant l'écoulement en régime transitoire.

Dans le cas d'un écoulement vertical sans perturbation issue de la respiration des plantes via les racines ($r_w = 0$), l'équation peut s'écrire de la façon suivante :

$$\frac{\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (\text{Eq. 18})$$

Cette équation contient deux inconnues (θ et h). Elle peut être exprimée selon h ou selon θ , en utilisant la relation $\theta(h)$.

L'équation de flux est exprimée en fonction de θ en posant l'hypothèse suivante :

- $K(h)$ est fonction de h et $h(\theta)$ est fonction de θ , donc K peut s'écrire en fonction de θ :

$$K(h(\theta)) \equiv K(\theta) \quad (\text{Eq. 19})$$

- la dérivée partielle $\partial h / \partial z$ peut être réécrite de la façon suivante :

$$\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} = \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (\text{Eq. 20})$$

$\frac{dh}{d\theta}$ est la pente de la courbe reliant le potentiel matriciel à la teneur en eau.

L'équation de Buckingham-Darcy devient alors :

$$J_w = -K(\theta) \frac{dh}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) = -D_w(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \quad (\text{Eq. 21})$$

Où:

$$D_w(\theta) = K(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad (\text{Eq. 22})$$

est appelée « diffusivité » de l'eau dans le sol.

L'équation de Richards peut s'exprimer à l'aide de cette diffusivité en écrivant :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_w(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (\text{Eq. 23})$$

La dérivée de la teneur en eau par rapport au temps peut aussi être exprimée comme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{dh} \frac{\partial h}{\partial t} = C_w(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Eq. 24})$$

où :

$$C_w(h) = \frac{d\theta}{dh} \quad (\text{Eq. 25})$$

est appelée « capacité capillaire ». Elle est égale à l'inverse de la pente de $h(\theta)$.

L'équation de Richards peut s'exprimer en fonction du potentiel matriciel, en écrivant :

$$C_w(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (\text{Eq. 26})$$

1.2.3 Transport des solutés

1.2.3.1 Densité de flux de solutés

Lorsqu'un soluté est présente dans la ZNS, son transport peut se faire dans la phase liquide et/ou dans la phase vapeur si celui-ci est volatile. Dans notre étude, les solutés considérés ne sont pas volatiles. Nous ne prendrons donc

en compte que le transport dans la phase liquide. La densité de flux de solutés s'exprime par:

$$J_{cl} = J_w C_l \quad (\text{Eq. 27})$$

où :

- C_l est la concentration du soluté dans la phase liquide
- J_{cl} est le flux de soluté par convection

J_w est une quantité approximative qui ne décrit qu'en moyenne le transport de l'eau dans la ZNS. Cette expression ne permet pas d'exprimer complètement le flux de solutés par convection, puisqu'il ne prend pas en compte tous les détails des mouvements convectifs dus à la tortuosité du réseau poral. Ces mouvements convectifs, dus à la tortuosité des pores, génèrent ce que l'on s'appelle la « dispersion hydrodynamique » (Bear, 1972), et la convection total du soluté s'exprime alors par :

$$convection\ total = J_{cl} + J_{hl} \quad (\text{Eq. 28})$$

où :

$$J_{hl} = -D_{lh} \frac{\partial C_l}{\partial z} \quad (\text{Eq. 29})$$

est la densité de flux de dispersion hydrodynamique, avec D_{lh} le coefficient de dispersion hydrodynamique [L^2/T].

Le coefficient de dispersion hydrodynamique est fréquemment observé proportionnel à la vitesse de l'eau dans les pores ($V = J_w/\theta$) (Biggar et Nielsen, 1967 ; Bear, 1972) :

$$D_{lh} = \lambda V \quad (\text{Eq. 30})$$

avec λ [L], est la dispersivité de la ZNS.

Un autre terme contribue au transport de soluté sous forme dissoute. Il s'agit de la diffusion moléculaire dans la phase liquide, J_{ld} , qui se formule :

$$J_{ld} = -D_l^s \frac{\partial C_l}{\partial z} \quad (\text{Eq. 31})$$

où D_s^l est le coefficient de diffusion moléculaire du soluté dans la phase solide et la phase liquide [L^2/T].

1.2.3.2 Equation de la conservation de la masse

De la même manière que pour l'équation de la conservation de l'eau, la conservation de la masse de solutés doit être vérifiée dans le cas d'un régime transitoire :

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} + \frac{\partial J_c}{\partial z} + r_c = 0 \quad (\text{Eq. 32})$$

Où C_T est la concentration totale [M/L^3], J_c , densité de flux massique de soluté (masse par unité de section du milieu poreux par unité de temps), r_c le taux de perte de masse par unité de volume par réaction ou par d'autres mécanismes (absorption racinaire).

Dans le cas de notre étude, les solutés sont de type conservatif et inerte, donc $r_c = 0$. Les solutés ne subiront aucune dégradation et ne s'adsorberont pas sur la phase solide.

1.2.3.3 Equation de convection-dispersion (CDE)

Le processus de transport le plus simple dans le sol s'applique aux substances non volatiles, non réactives (inertes, non adsorbées par la phase solide du sol) et conservatives (pas de dégradation ou de transformation).

L'équation de convection-dispersion simple est de la forme :

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 C_l}{\partial z^2} - V \frac{\partial C_l}{\partial z} \quad (\text{Eq. 33})$$

Avec D_e , le coefficient effectif de dispersion hydrodynamique égal à

$$D_e = \frac{(D_{hl} + D_l^s)}{\theta} = D/\theta \quad (\text{Eq. 34})$$

1.2.3.4 Courbe de percée

La courbe de percée est une courbe qui représente la concentration réelle ou relative en fonction du temps ou d'une unité volumique qui s'apparente au temps (Figure 4). Elle est obtenue à la suite d'une expérience d'élution sur colonne. Plusieurs critères de forme de cette courbe permettent d'obtenir des indications sur le fonctionnement hydraulique du matériau sur lequel est réalisé l'essai.

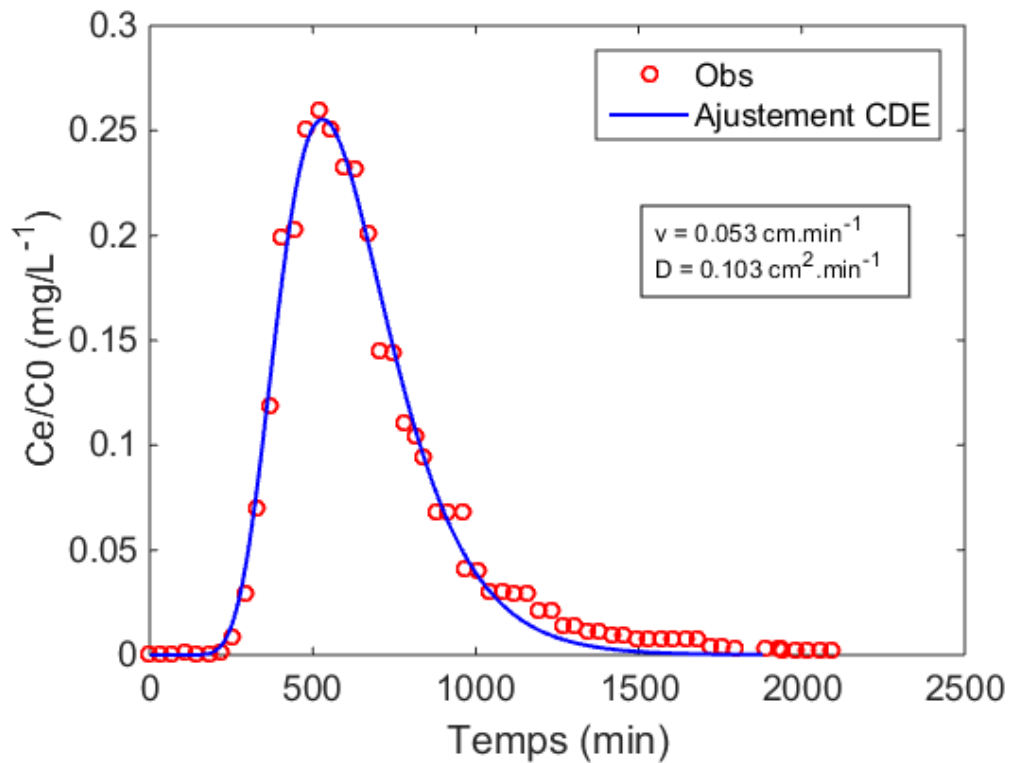


Figure 4: Exemple de courbe de percée (provenant de cette étude)

1.2.3.5 Phénomènes hors équilibre

1.2.3.5.1 Transfert dans les milieux non saturés

En 1961, Nielsen et Biggar ont réalisé deux expériences sur une seule et même colonne de sable remanié. L'une des expériences a été réalisée alors que la colonne est saturée, et l'autre alors que la colonne n'est pas saturée. Les auteurs observent que les courbes de percée sont différentes pour les deux expériences. La Figure 5 montre la différence de comportement du transport de soluté en milieu saturé et en milieu non saturé.

Pour le cas de la colonne en milieu saturé, la courbe de concentration cumulée n'est pas symétrique et montre une forme d'écoulement hors équilibre. Dans le cas de la colonne non saturée, la désaturation élimine les chemins d'écoulement et augmente le volume d'eau dans l'échantillon qui ne participe pas à l'écoulement. Les auteurs observent que la désaturation de la colonne engendre un décalage de la courbe de percée vers la gauche. Néanmoins une équation de convection dispersion classique (§ 1.2.3.3) suffit à reproduire le tracé des observations expérimentales.

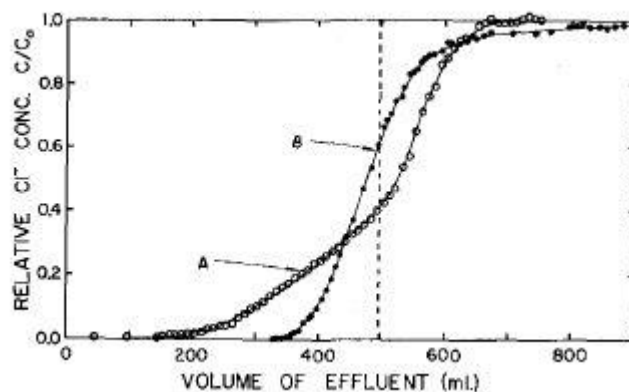


Figure 5: Courbes de percée en concentration relative cumulée en fonction du volume d'eau sortie ; A : expérience alors que la colonne est saturée ; B : expérience alors que la colonne est non saturée (Nielsen et Biggar, 1961).

1.2.3.5.2 Transport préférentiel sur le terrain

Le transport préférentiel peut prendre des formes variées. Pour un sol structuré, les macropores (fissures, trous de racine, passages de vers de terre (Figure 6)), peuvent dominer l'hydrologie, en particulier dans les sols à

texture fine, où ils jouent le rôle de chemins à haute conductivité hydraulique dans une matrice imperméable (Beven et Germann, 1982 ; Beven et Germann, 2013).

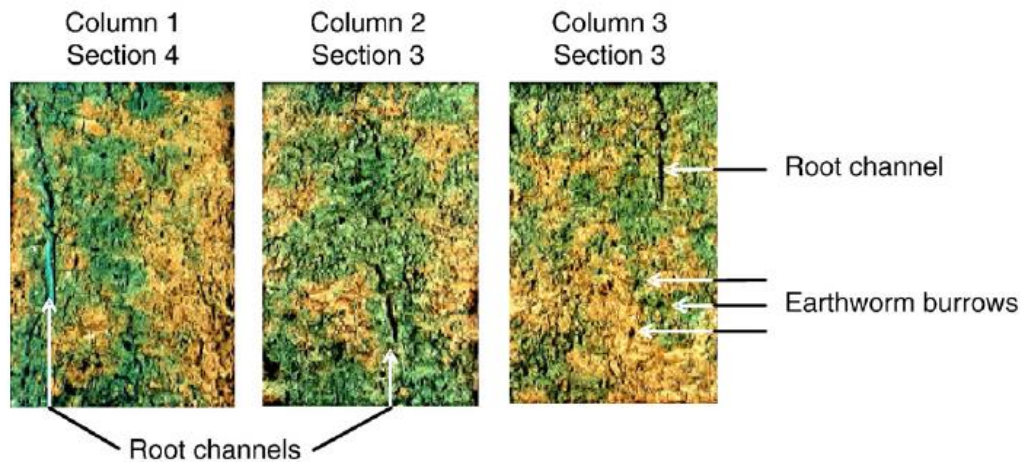


Figure 6: Illustration des processus de transport préférentiel à l'aide d'un traceur coloré (Dousset et al., 2007)

Flury et al. (1994) étudient 14 sols différents et montrent que le transport préférentiel a lieu dans tous les sols. L'état hydrique du sol a une influence sur la profondeur maximale de pénétration du traceur. Dans le cas de sols grossiers, le maximum de pénétration du soluté est toujours plus important lorsque l'état hydrique initial est humide. Lorsque le sol a une texture moyenne, l'état hydrique initial n'a pas d'impact sur la profondeur du maximum de pénétration du soluté. L'écoulement se fait sous la forme de digitation. Ces instabilités pourraient être causées par une hétérogénéité du profil, comme une limite entre deux horizons (Hendrickx et al., 1993). Gerke (2006) propose une revue descriptive des phénomènes de transport préférentiel dans les sols structurés.

1.2.3.5.3 L'interruption de flux comme outil d'étude des phénomènes hors équilibre

De nombreux auteurs ont mis en évidence ces phénomènes hors équilibre en laboratoire sur des colonnes de sols (van Genuchten and Wierenga, 1976 ; Brusseau, 1992 ; Jarvis, 1998). Ces phénomènes se traduisent par une part plus ou moins importante de l'eau contenue dans la colonne qui ne participe

pas au transport du soluté. Cette eau est nommée « eau stagnante » ou « eau immobile ».

Les expériences en laboratoire permettent une étude fondamentale des facteurs qui influencent l'apparition de ces phénomènes hors équilibre. Plusieurs auteurs ont discuté de l'influence de l'état hydrique initiale (plus précisément la teneur en eau) du sol sur la favorabilité des phénomènes hors équilibre (While et al., 1986 ; Clothier et Green, 1994). Köhne et al. (2004) montrent que les états hydriques initiaux extrêmes (humide et sec) engendrent plus de phénomènes hors-équilibre que les états hydriques intermédiaires. Ces phénomènes sont donc plus propices à apparaître en régime transitoire.

Dès 1997, Brusseau et al. utilisent l'interruption de flux (arrêt brutal de l'apport d'eau en sommet de colonne) pour étudier plus précisément les phénomènes hors équilibre (Figure 7).

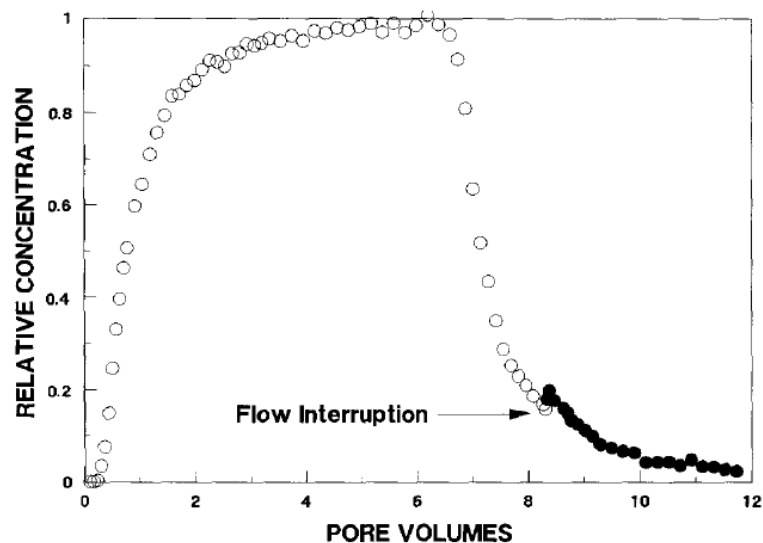


Figure 7: Effet de l'interruption de flux (1h) sur la courbe de percée (Brusseau et al., 1997)

Les auteurs concluent qu'il s'agit d'un bon moyen pour mettre en évidence la présence d'eau stagnante ou immobile pour peu que le transfert de masse du soluté soit assez important entre l'eau stagnante et l'eau participant à l'écoulement. Les phases d'interruptions peuvent s'accompagner de drainage

(suction à la base de la colonne) pour modifier l'état hydrique de la colonne et jouer sur le transfert entre l'eau stagnante et l'eau participant à l'écoulement (Cote et al., 2000). Allaire et al. (2009) proposent une revue des différentes techniques permettant de quantifier le transport préférentiel.

1.2.4 Modèles hors équilibre

Il existe beaucoup de modèles de transport en milieu poreux. Tout d'abord, il existe les modèles de transport à l'équilibre qui traduisent un écoulement uniforme sans interaction physique ou chimique avec la matrice du sol (Figure 8a). Ces écoulements se traduisent par l'équation de convection-dispersion classique (§ 1.2.3.3) sans partitionnement de la teneur en eau. Ce type de modèle ne permet pas d'expliquer les transports préférentiels. Des modèles plus complexes ont été développés pour permettre de prendre en compte les phénomènes hors équilibre, qu'ils soient de nature physique (partitionnement de l'eau) (Figure 8b, c, d et e) ou de nature chimique (dus à des phénomènes de sorption du soluté). Les deux types de modèles de transport (hors équilibre physique et hors équilibre chimique) sont développés par Nkedi-Kizza et al. (1984).

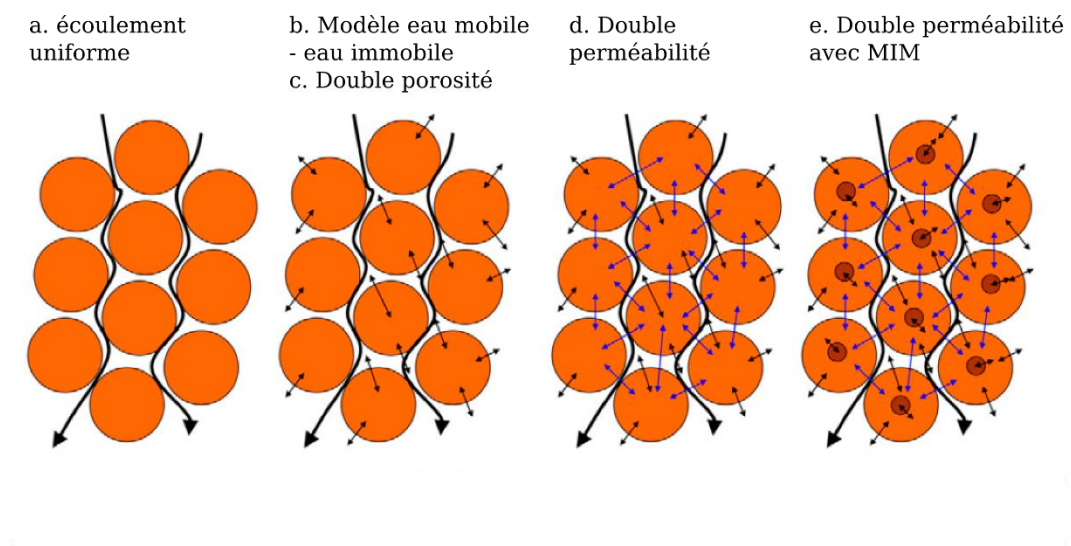


Figure 8: Modèles conceptuels hors-équilibre physique pour l'écoulement de l'eau et le transport de soluté (Simunek et van Genuchten, 2008)

Les modèles hors-équilibre chimique caractérisent le phénomène de sorption comme un processus cinétique. Ce processus est couramment décrit par une équation de transfert de premier ordre. Ce modèle peut être complexifié en fractionnant les sites de sorption et en supposant des vitesses de transfert différentes pour chaque type de sites (Selim et al., 1976 ; van Genuchten and Wagenet, 1989). Le plus simple est le modèle à deux sites. L'échange au sein des sites de la première fraction est considéré comme instantané, et une cinétique de sorption a lieu dans les sites de la seconde fraction. Un modèle plus complexe (Two Kinetic Sites Model) (Rao et al., 1979) fait l'hypothèse que la cinétique de sorption a lieu dans les deux sites à des vitesses différentes.

1.2.4.1 Modèle hors équilibre physique

Pour prendre en compte la structure du sol et les macropores, les modèles se sont complexifiés avec un partitionnement de l'eau (Gerke and van Genuchten, 1993 ; Gwo et al., 1995 ; Jarvis, 1998). Dans les modèles de type double porosité ou double perméabilité, le milieu poreux est considéré comme la superposition de deux régions qui interagissent. L'une est associée à un espace poral de type macropores, fractures ou porosité inter-agrégat. L'autre est associée à un espace poral de type micropores ou porosité intra-agrégats. Dans les modèles de type double porosité (Figure 8b et c), l'eau contenue dans les micropores est considérée stagnante. Dans les modèles à double perméabilité, cette eau s'écoule plus lentement dans la matrice (Figure 8d et e), en comparaison de l'écoulement dans la macroporosité.

La présence de processus hors équilibre physique se traduit par une asymétrie de la courbe de percée que l'équation de convection dispersion classique ne permet pas de reproduire. C'est pourquoi différents modèles ont vu le jour dans le but de reproduire et de prévoir ces phénomènes hors équilibre (Simunek et van Genuchten, 2008). Nous nous concentrerons plus particulièrement sur les modèles hors équilibre physique et plus spécifiquement sur le modèle MIM.

1.2.4.2 Modèle eau mobile-eau immobile (MIM)

Van Genuchten et al. (1977) utilisent l'hypothèse du partitionnement de l'eau développée par Coats and Smith (1964) pour accommoder la forme de la courbe en présence de processus hors équilibre. Le domaine poral est partitionné en une région occupée par de l'eau mobile et une région porale occupée par de l'eau stagnante (van Genuchten et Wieranga, 1976 ; van Genuchten et Wieranga, 1977 ; de Smedt et Wieranga, 1979a, 1979b). Cette conceptualisation a pour effet de diminuer le volume poral disponible pour l'écoulement dans l'expression de la loi de Darcy en milieu non saturé et ainsi d'accommoder l'arrivée précoce de la courbe de percée. Le soluté est transporté par un processus de convection-dispersion dans la région mobile, avec un échange de masse traduit par une vitesse de diffusion vers la région immobile :

$$\theta_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_m D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} - V_m \theta_m \frac{\partial C_m}{\partial z} \quad (\text{Eq. 35})$$

La vitesse de diffusion de la région mobile vers la région immobile s'exprime par :

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (\text{Eq. 36})$$

Où α est le coefficient échange du soluté entre les phases mobile et immobile [T⁻¹].

Ce modèle est limité au régime permanent contrairement aux modèles comme MACRO qui sont appliqués au régime transitoire (Jarvis et al., 1991 ; Jarvis 1994). Le modèle de transport MIM est aussi utilisé pour interpréter les données d'infiltromètres à disque, mais son utilisation reste cantonnée aux régimes permanents proches de la saturation (Jaynes et al., 1995).

Le concept du modèle MIM, initialement pensé pour des situations en régime permanent, a fait l'objet de diverses tentatives pour être transposé en régime

transitoire (Russo et al., 1989 ; Larsson et Jarvis, 1999) L'extension de son concept au régime transitoire est déclinée en trois possibilités par Zurmühl and Durner (1996).

- (i) La teneur en eau immobile (θ_{im}) est constante au cours du temps
- (ii) Le ratio de la teneur eau mobile sur la teneur en eau totale θ_m/θ est constant au cours du temps,
- (iii) θ_{im} est définie de telle sorte que le ratio de la conductivité hydraulique $K(\theta_{im})/K(\theta)$ soit constante.

Les auteurs ont montré que les deux premières approches limitent l'impact sur le transport du soluté, ce qui se traduit par des simulations très proches d'une approche classique avec un seul domaine.

Larsson et Jarvis (1999) traduisent l'échange entre les deux régions comme un échange par advection.

Simunek et al. (2003) décrit les échanges entre ces deux régions comme un différentiel de teneurs en eau :

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - \Gamma_w$$

$$\frac{\partial \theta_{im}}{\partial t} = \Gamma_w$$

(Eq. 37)

Cette version a été implémentée dans HYDRUS 1D (Simunek et al., 2005). Il est possible de modéliser le terme d'échange pour l'eau, Γ_w est appelé transfert de masse proportionnel à la différence de teneur en eau ou proportionnel à la différence de potentiel matriciel.

$$\Gamma_w = \frac{\partial \theta_{im}}{\partial t} = \omega [S_e^m - S_e^{im}]$$

(Eq. 38)

où ω est le coefficient de transfert de masse [T^{-1}], S_e^m et S_e^{im} sont la saturation effective dans la région mobile et dans la région immobile :

$$Se_m = \frac{\theta_m - \theta_{m,r}}{\theta_{m,s} - \theta_{m,r}}$$

$$Se_{im} = \frac{\theta_{im} - \theta_{im,r}}{\theta_{im,s} - \theta_{im,r}}$$
(Eq. 39)

où $\theta_{m,r}$ et $\theta_{m,s}$ sont respectivement les teneurs en eau résiduelles et à saturation dans le domaine de l'eau mobile, et $\theta_{im,r}$ et $\theta_{im,s}$ sont respectivement les teneurs en eau résiduelles et à saturation dans le domaine de l'eau immobile.

Dans le cas où Γ_w est considéré comme proportionnel à la différence de pression entre les deux domaines :

$$\Gamma_w = \alpha_w(h_m - h_{im})$$
(Eq.40)

où α_w est le coefficient de transfert de masse [T^{-1}], h_m et h_{im} sont le potentiel matriciel dans la région mobile et la région immobile. Cette alternative peut être utilisée quand on considère la courbe de rétention en eau identique pour les deux domaines (Köhne et al., 2004)

Le modèle de transport de soluté est décrit par :

$$\frac{\partial(\theta_m c_m)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_m D_m \frac{\partial c_m}{\partial z} \right) - \frac{\partial(q_m c_m)}{\partial z} - \Gamma_s$$

$$\frac{\partial(\theta_{im} c_{im})}{\partial t} = \Gamma_s$$
(Eq. 41)

Γ_s [$M L^{-3} T^{-1}$] est la vitesse de transfert de soluté entre l'eau mobile et l'eau immobile :

$$\Gamma_s = \alpha (c_m - c_{im}) + \begin{cases} \omega(Se_m - Se_{im})c_m & \text{if } Se_m > Se_{im} \\ \omega(Se_m - Se_{im})c_{im} & \text{if } Se_m < Se_{im} \end{cases}$$
(Eq.42)

où α [T^{-1}] est le coefficient de diffusion entre l'eau mobile et l'eau immobile.

Ces deux types d'approches nécessitent respectivement 11 et 13 paramètres. Köhne et al. (2004) ont montré que les paramètres de MIM pour le régime

transitoire peuvent être estimés à partir d'expérimentations sur colonnes par des procédés d'optimisation sous HYDRUS-1D. Bien que l'acquisition de ces paramètres soit plus fiable indépendamment (*in situ* et expérience de laboratoire), la mesure nécessite un investissement important.

Cheviron et Coquet (2009) ont étudié la sensibilité du modèle MIM en régime transitoire. Les résultats montrent que la teneur en eau mobile à saturation et la teneur en eau immobile à saturation sont des paramètres sensibles ($\theta_{m,s}$, $\theta_{im,s}$), ainsi que le paramètre de forme n de l'équation de Mualem/van Genuchten utilisée pour la description de $\theta(h)$ (§ 1.2.1.4.3).

2 Chapitre 2 : Matériels et Méthodes



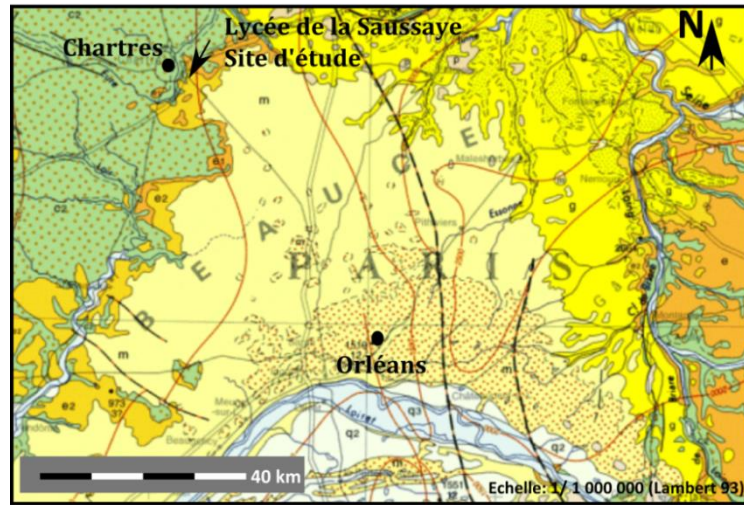
(a) ouverture de la fosse, (b) zoom du matériau, (c) zone d'étude, (d) zoom sur le profil de la fosse, (e) haut les cœurs, il est l'heure de creuser, (f) colonne 10 de 60 cm de longueur, (g) zoom sur la colonne 10.

2.1 La zone non saturée étudiée

2.1.1 Localisation

L'ensemble des expériences menées dans ce projet de thèse porte sur la ZNS des Calcaires de Beauce, et plus particulièrement sur le site du lycée agricole de la Saussaye à 5 km au sud-est de Chartres (Figure 9B). Ce site, facile d'accès, permet l'étude de la ZNS qui se trouve au Nord-Ouest de l'extrémité du Calcaire de Beauce (Figure 9A). Ce dernier est directement accessible sous une faible épaisseur de sol (30-40 cm) (Figure 10).

(A) Carte géologique de la Beauce (fond de carte BRGM)



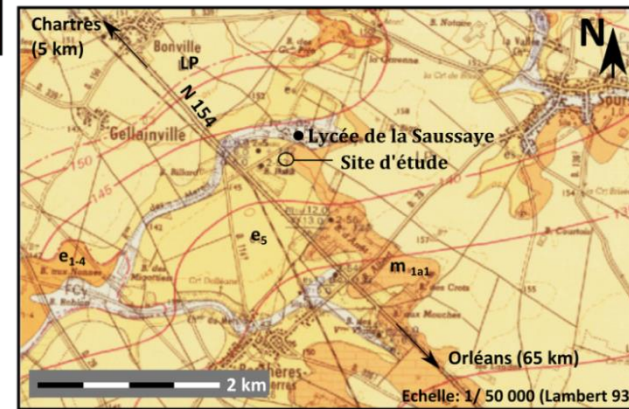
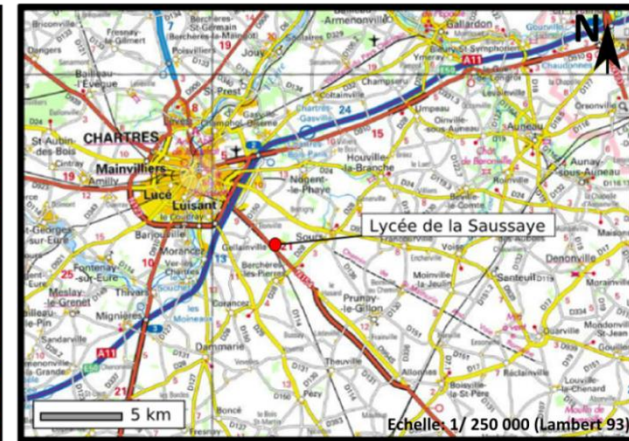
Légende (A)

- p Pliocène
- g Oligocène
- e₂ Eocène moyen supérieur
- e₁ Eocène inférieur
- c₂ Crétacé supérieur

Légende (C)

- LP Limons des plateaux
- m_{1a1} Marne de Voise, Calcaire de Berchère (Aquitainien inférieur).
- e₅ Marnes pulvérulentes de Villeau, Calcaire de Morencez (Lutétiens)
- e₁₋₄ Argile à Silex

(B) Localisation de la zone d'étude (fond de carte IGN)



(C) Zoom sur la géologie du site (fond de carte BRGM Feuille n°291-VOVES)

Figure 9 : A- Carte géologique de la Beauce du BRGM au 1/1 000 000 ; B - Localisation de la zone d'étude, carte routière IGN au 1/250 000 ; C- Zoom sur la géologie du site, carte du BRGM au 1/50 000.



Figure 10: Photographie du champ sur lequel est réalisée l'étude sur le site du lycée de la Saussaye.

2.1.2 Contexte

2.1.2.1 Contexte géographique

La Beauce est une région agricole de 9000 km² située au sud-ouest de Paris. Ce plateau calcaire a pour limite la Loire au Sud, le Loing à l'Est, La Cisse, le Loir et l'Eure à l'Ouest et, au Nord, sa limite se dessine au niveau des rivières de la Drouette (affluent de l'Eure), de la Remarde et de L'Orge. Cette vaste région s'étend sur 6 départements (Eure-et-Loir, Loir-et-Cher, Yvelines, Essonne, Seine-et-Marne). Cette région française est bien connue pour son paysage plat et dénudé où seules les éoliennes viennent casser la monotonie des champs.

Aussi nommé « le grenier de la France », La Beauce est exclusivement vouée aux grandes cultures céréalières intensives depuis 50 ans. Il s'agit de la première région européenne pour la production de céréales (Landrin, 2012). Le réseau hydrologique de surface est pauvre, mais l'eau dans le sous-sol est abondante et permet des apports importants par l'irrigation. Depuis les années 1950, la politique agricole de rendement a fortement encouragé l'utilisation d'engrais et de pesticides à grande échelle. Le manque de cours d'eau et les forages mal conçus ont acheminé des eaux de surface vers la nappe engendrant une pollution généralisée de la nappe (Figure 11A). Cette nappe exploitée pour l'industrie et pour l'alimentation en eau potable (AEP) dépasse la norme de 50 mg/L et oblige les collectivités territoriales à mixer

l'eau provenant de différents puits pour abaisser le taux de nitrate en dessous de ce seuil (Figure 11B).

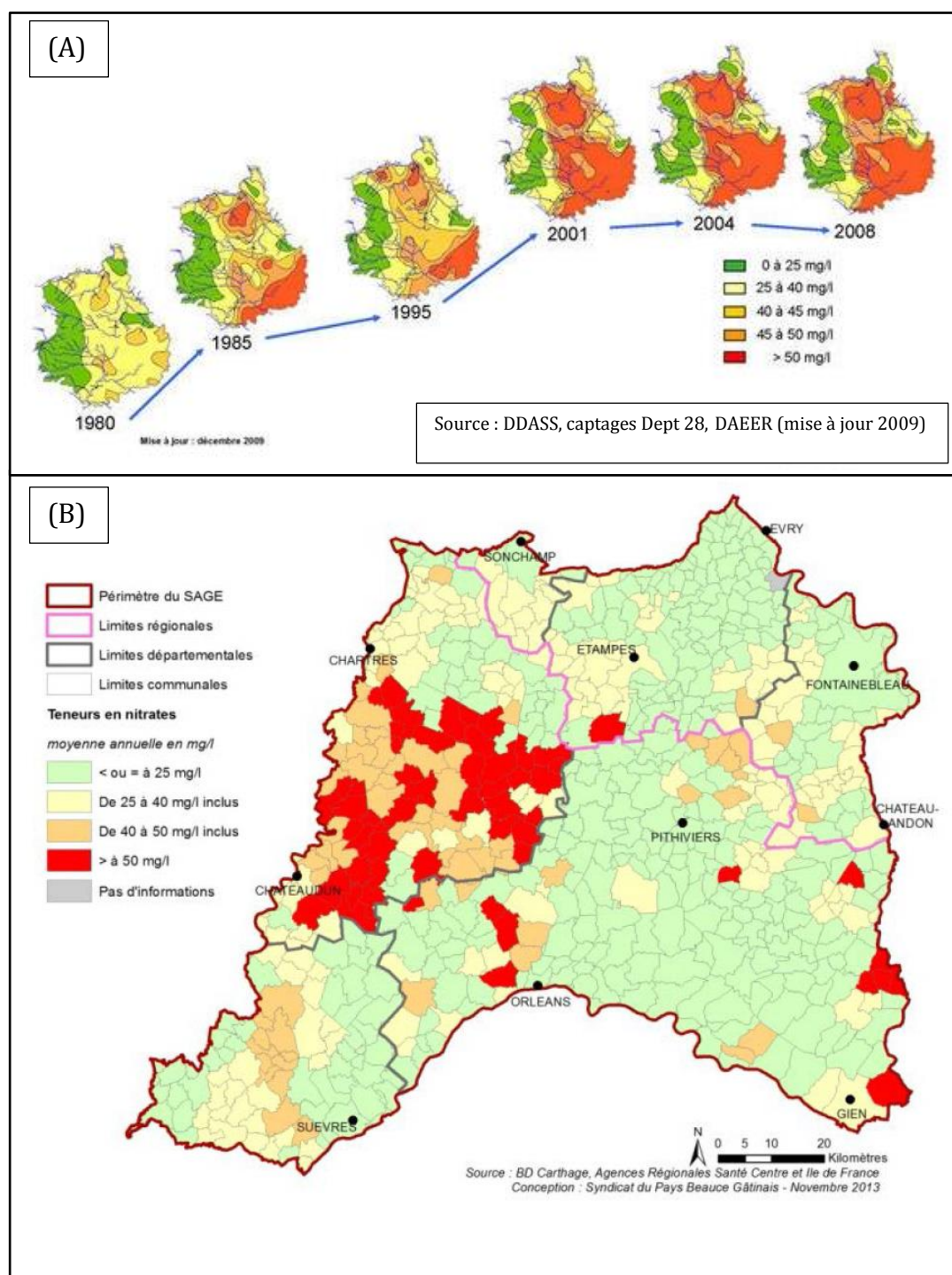


Figure 11: A- Evolution des taux de nitrate en région centre depuis 1980 jusqu'à 2008 ; B-Carte de teneur en nitrate dans les eaux de distribution en 2012.

2.1.2.2 Contexte géologique

La Calcaire de Beauce correspond à l'extension d'un lac datant entre 43 et 25 millions d'années. Les sédiments lacustres peuvent atteindre 300 m d'épaisseur et être interrompus par des épisodes marins responsables de dépôts marneux (Maget and Pointet, 2006).

L'aquifère se compose d'une succession de formations lacustres à dominantes calcaire et marneuse distinctes. De la surface vers la profondeur, on distingue :

- Le Calcaire de Pithiviers, sur la moitié ouest de la Beauce
- La Molasse du Gâtinais, couche semi-perméable, dénommée aussi « Calcaire du Gâtinais »,
- Le Calcaire d'Etampes,
- Les Sables de Fontainebleau, présents dans la partie Nord-Est de la Beauce,
- La Molasse d'Etrechy,
- Le Calcaire de Brie, présent au Nord-Est,
- Les Marnes Vertes,
- Le Calcaire de Champigny, plus largement étendu au Nord-Est de la Beauce.

Sous le système Beauce se trouve l'aquifère de la Craie, ces deux entités sont séparées par une formation d'Argile à Silex.

Sur la zone d'étude du lycée de la Saussaye, on distingue deux lithologies sur la carte du BRGM au 1/50 000 (Figure 9C).

D'après la notice géologique (notice VOVES n°291), la lithologie « e₅ », Calcaire de Morancez (Lutétien) est un calcaire pulvérulent farineux, dans des couleurs allant de blanc à ocre-orangé. Cette formation est constituée à 98 % de calcite pure, finement cristallisée. Un front de taille de 10 m présent dans une carrière (Villeau) a dévoilé un calcaire farineux pulvérulent dont le faciès était remarquablement homogène. Dans cette même carrière, des poches d'argile verte ont été découvertes au sommet de cette formation.

La lithologie « m_{1a1} », Calcaire de Berchères (Aquitanien inférieur) est un calcaire dur avec des marnes friables blanches. Cette lithologie vient juste après les affleurements de type Morancez et immédiatement avant les affleurements typiques des Calcaires de Beauce, il s'agit d'un faciès latéral de ce dernier. Il se différencie des affleurements du Lutétien par un taux de calcite inférieur aux affleurements de l'Aquitanien, entre 75-80%.

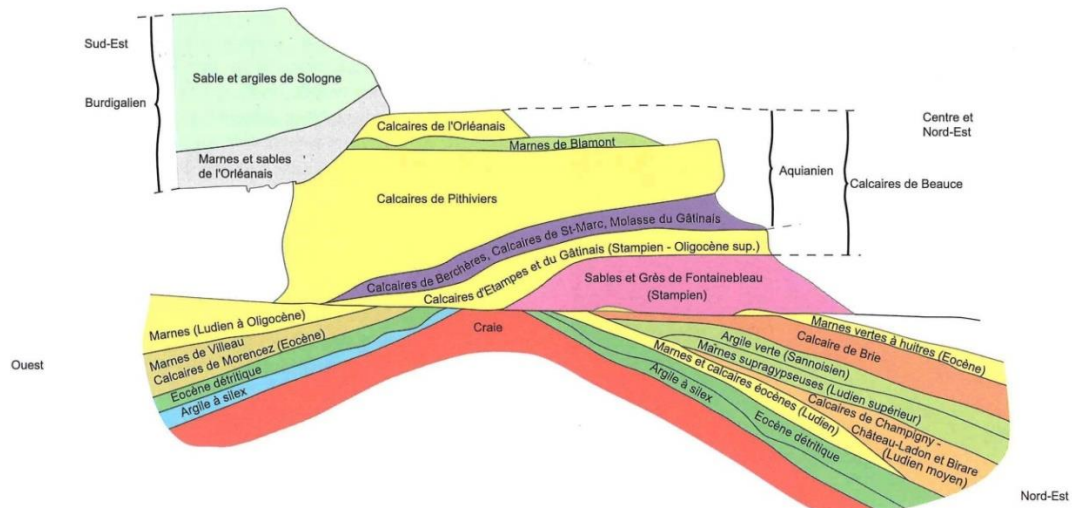


Figure 12: Empilement stratigraphique des formations du calcaire de Beauce (source: BRGM).

2.1.2.3 Fonctionnement hydrique

La nappe de la Beauce est contenue dans une série de bancs calcaires entrecoupés de sables et de marnes. C'est un système multicouche complexe. De plus, les bancs de calcaires sont fortement fracturés et karstifiés plus on s'approche de la Loire. C'est un système continu, communiquant sur toute son extension verticale.

La nappe est en grande partie libre, mais devient captive dans sa partie Sud/Sud-Est sous la formation du Burdigalien (Figure 13), qui correspond à l'extension de la forêt d'Orléans. La nappe de Beauce possède deux écoulements majeurs : un écoulement du Sud (forêt d'Orléans) vers le Nord (la Seine) dans sa partie Est ; et un écoulement du Nord vers le Sud (la Loire) dans sa partie Ouest (Figure 13).

La nappe est alimentée uniquement par la pluie (690 mm/an) avec une recharge effective de 175 mm/an, en moyenne (Maget and Pointet, 2006).

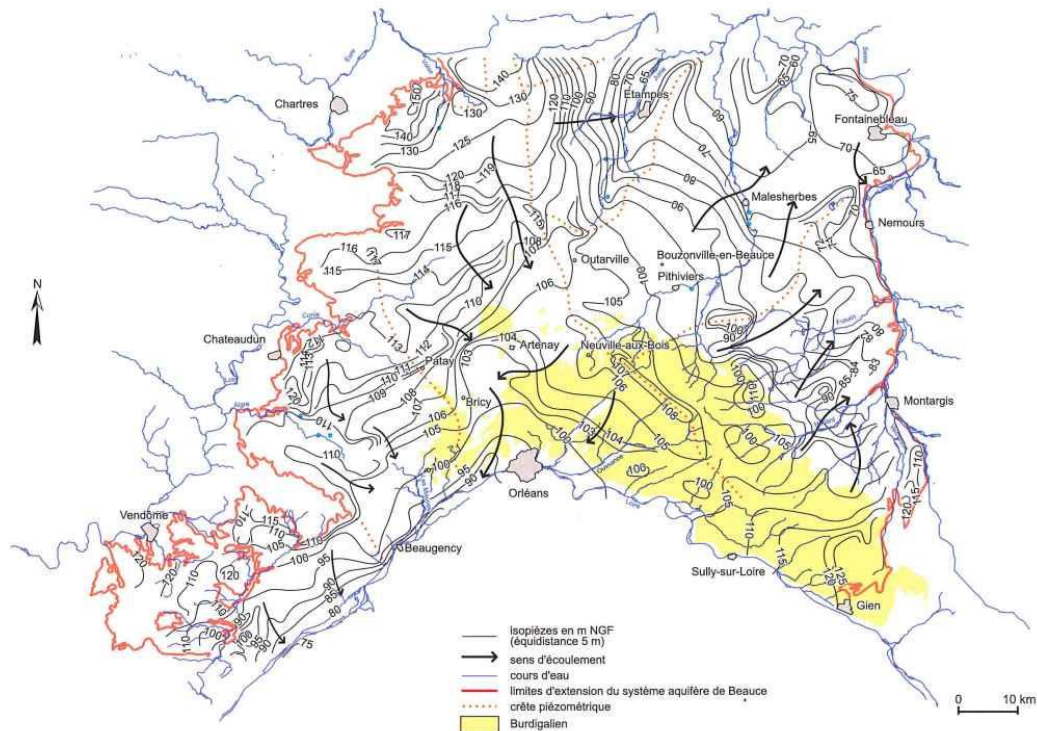


Figure 13 : Carte hydrologique de la nappe de la Beauce (source : BRGM).

2.1.2.4 Problématique de pollution sur la commune de Chartres

Le site d'étude se situe à la limite d'extension du système aquifère de Beauce. La couverture des Calcaires de Beauce fait environ 4 m au droit de la zone d'étude d'après les logs stratigraphiques des ouvrages alentours. Sous le calcaire se trouve la craie. L'aquifère de la craie est la source d'eau potable qui alimente la commune de Chartres en eau potable. Dans cette commune, une grande partie des concentrations de nitrates mesurées au cours du temps dépasse la limite de potabilité (50 mg/L) (Figure 14). L'aquifère de la craie fait l'objet d'études (Vachier et al., 1979) et de suivis réguliers pour endiguer l'augmentation constante des taux de nitrates aux puits. Malgré une bonne connaissance de l'hydrologie de l'aquifère, l'impact des apports azotés dans la région sur la concentration en nitrate reste très importante.

Dans le continuum ZNS-ZS, le transport dans la ZS (donc dans la craie) est bien compris, mais pas dans la ZNS des Calcaires de Beauce. Dans cette partie des Calcaires de Beauce, le calcaire est un calcaire Eocène/Miocène détritique avec des lentilles d'argile. Le fonctionnement et la vitesse de transport du nitrate sont méconnus dans la ZNS des Calcaires de Beauce.

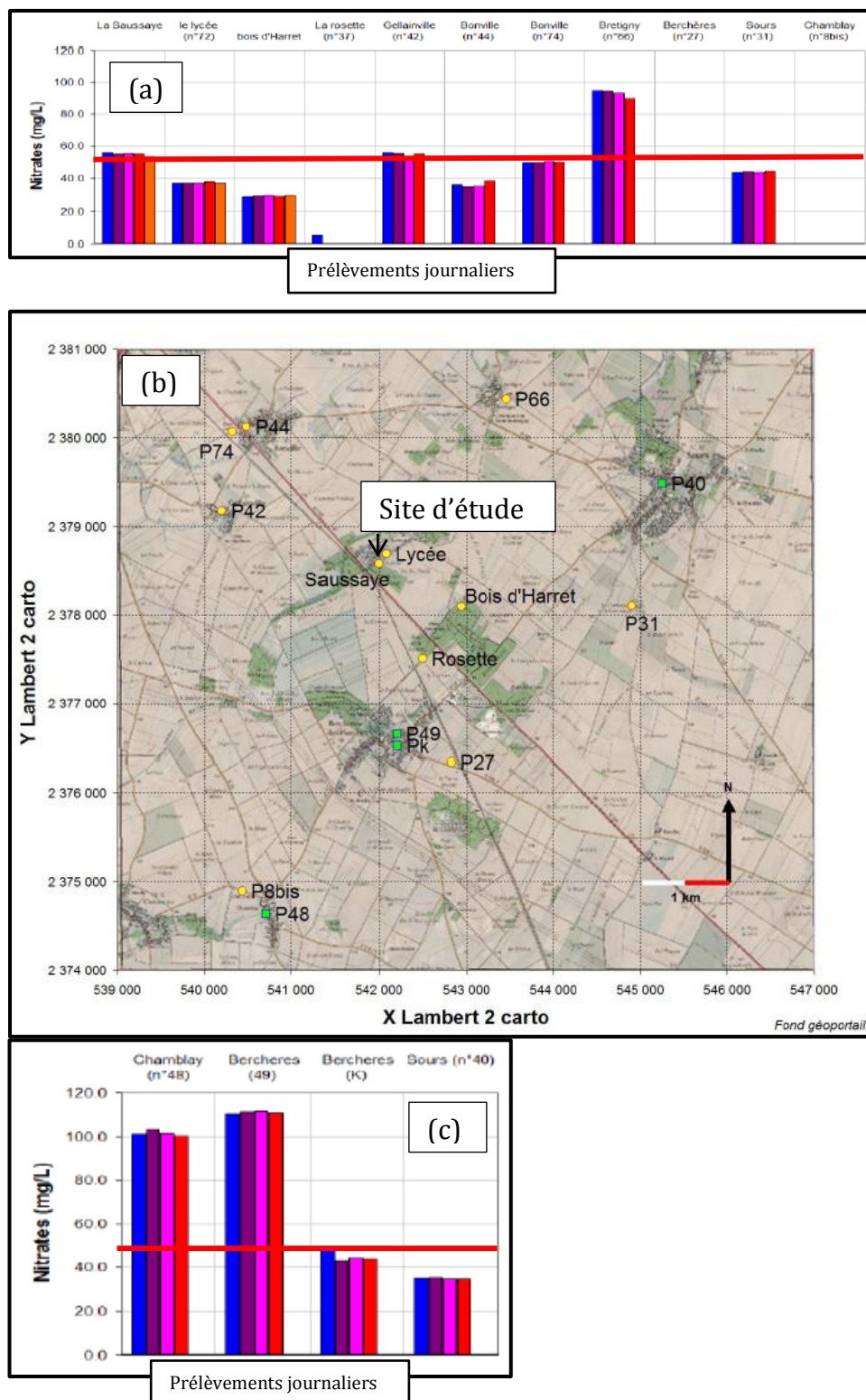


Figure 14: Suivi des concentrations en nitrate sur la zone d'étude, (a) suivi de la concentration en nitrate sur les puits du Nord de la zone d'étude, (b) carte de localisation des puits, (c) suivi de la concentration en nitrate dans les puits du Sud de la zone d'étude (Dedewanou et al., 2015b).

2.1.3 Echantillonnage et prélèvements

2.1.3.1 Echantillonnage

Au cours de deux campagnes de terrain (11-12/03/2014 et 11/04/2014) sur le site de Chartres, dix colonnes de matériaux en place, aux caractéristiques variées, ont été prélevées (Tableau 1). Les colonnes qui ont été utilisées dans le cadre de ce projet de thèse sont identifiées en gras. La colonne 6 est constituée d'un matériau calcaire homogène blanc relativement fin. La colonne 8 est constituée d'un matériau calcaire hétérogène ocre et blanc grossier. La colonne 3 est constituée d'un matériau calcaire homogène blanc fin.

Tableau 1: Colonnes non perturbées prélevées sur le site du Lycée de Saussaye.

Numéro de la colonne	Date de prélèvement	Longueur de la colonne	Diamètre externe	Profondeur de prélèvement*
	(jj/mm/aaaa)	(cm)	(cm)	(cm)
1	11/03/2014	30	10	40-70
2	11/04/2014	30	10	80-110
3	11/04/2014	30	10	80-110
4	11/04/2014	30	10	80-110
5	11/03/2014	30	20	40-70
6	11/04/2014	30	20	80-110
7	12/03/2014	30	20	40-70
8	12/03/2014	30	20	64-94
9	11/03/2014	60	20	50-110
10	11/04/2014	60	20	90-140

* depuis le niveau du sol avant décaissement,
en gras : colonnes utilisées dans le cadre du projet de thèse

2.1.3.2 Prélèvements

Le prélèvement des colonnes s'est fait sur le site de la Saussaye, un lycée agricole à 5 km au sud-est de Chartres. Les quarante premiers centimètres du sol ont été décapés dévoilant le substrat rocheux calcaire. Deux colonnes (H : 30 cm, D : 20 cm) de calcaire non perturbé ont été prélevées dans le calcaire

Eocène dans deux faciès : la colonne '6' a été prélevée dans un faciès de calcaire blanc homogène alors que la colonne '8' a été prélevée dans un faciès de calcaire ocre hétérogène. Une colonne (H : 30 cm, D : 10 cm) de calcaire non perturbée a été prélevée dans le calcaire blanc homogène (colonne '3'). Le prélèvement se fait par percussion à l'aide d'un préleveur (Figure 15).

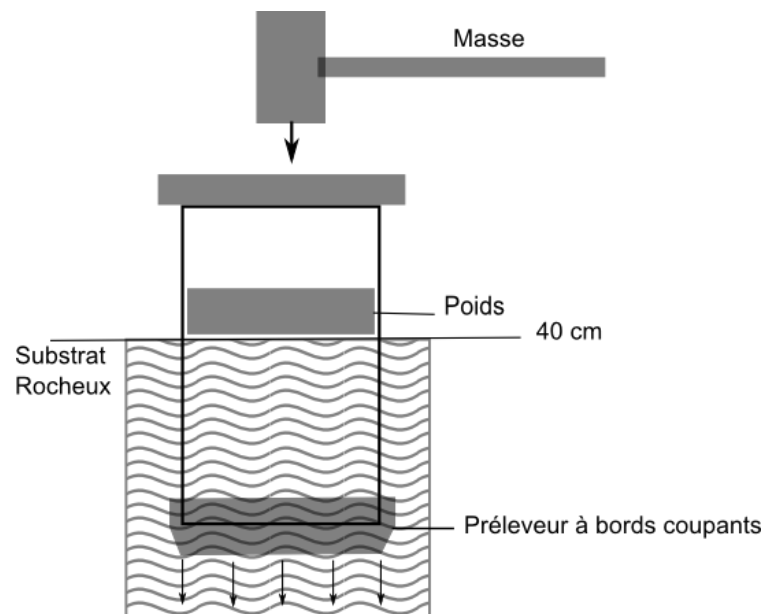


Figure 15: Schéma de principe décrivant le protocole de prélèvement.

Le sommet de la colonne est protégé par une pièce en bois qui permet de répartir la force de la frappe. Une pièce métallique aux bords coupants, le préleveur est installé en butée à la base du cylindre. Un poids est placé à l'intérieur du cylindre en plexiglass, ce poids a pour rôle d'atténuer les vibrations dûes aux secousses des percussions répétées et de maintenir la cohérence de la structure du calcaire. A la suite de ces prélèvements, un instrument spécifique a été conçu (Annexe 1). Une fois que la colonne est entrée dans le calcaire, la colonne est décaissée latéralement. Le sommet de la colonne est obturé. Puis la colonne est décaissée sous sa base, la colonne est basculée (base vers le ciel) et obturée.

2.2 Expériences d'Elution sur Colonne

2.2.1 Conception du dispositif

Pour étudier les processus de transport, les colonnes sont installées dans un dispositif expérimental (Figure 16)(Annexe 2) . Le dispositif se compose de trois parties:

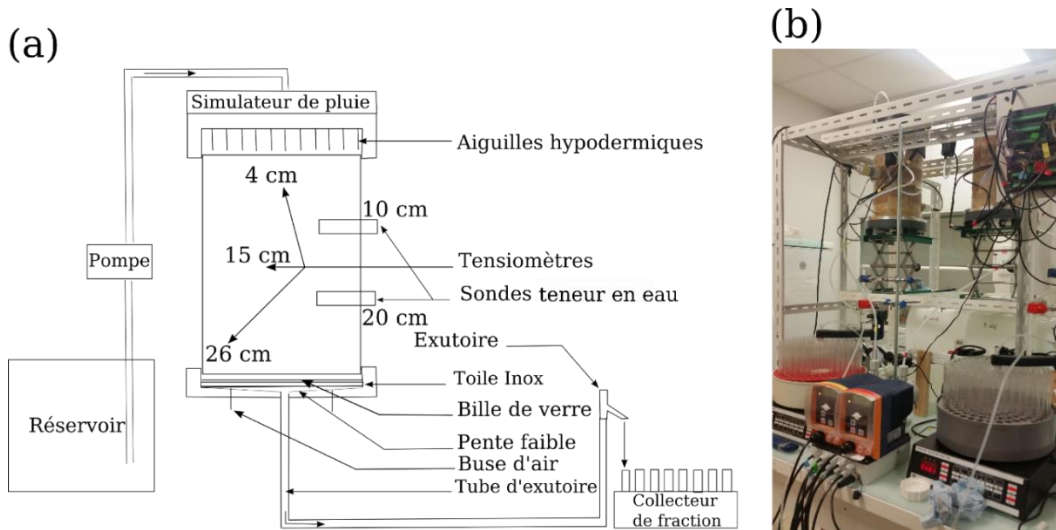


Figure 16: (a) schéma du dispositif expérimental, (b) photographie du dispositif en laboratoire.

2.2.1.1 Simulateur de pluie

Un simulateur de pluie permet l'apport d'une solution de traceur dans 5 mM de CaCl_2 (Jaynes, 1994) en haut de la colonne (Figure 17). Une pompe apporte la solution. Celle-ci est stockée dans un réservoir. La surpression créée par l'arrivée continue de solution engendre une pression dans le réservoir qui permet de répartir de manière homogène la solution sur toute la surface de la colonne (Annexe 3). La distribution hexagonale des aiguilles hypodermiques assure l'homogénéité de l'apport (Annexe 4). La vitesse du flux entrant est maintenue constante pour les expériences en régime permanent, ou interrompue pour les régimes transitoires.

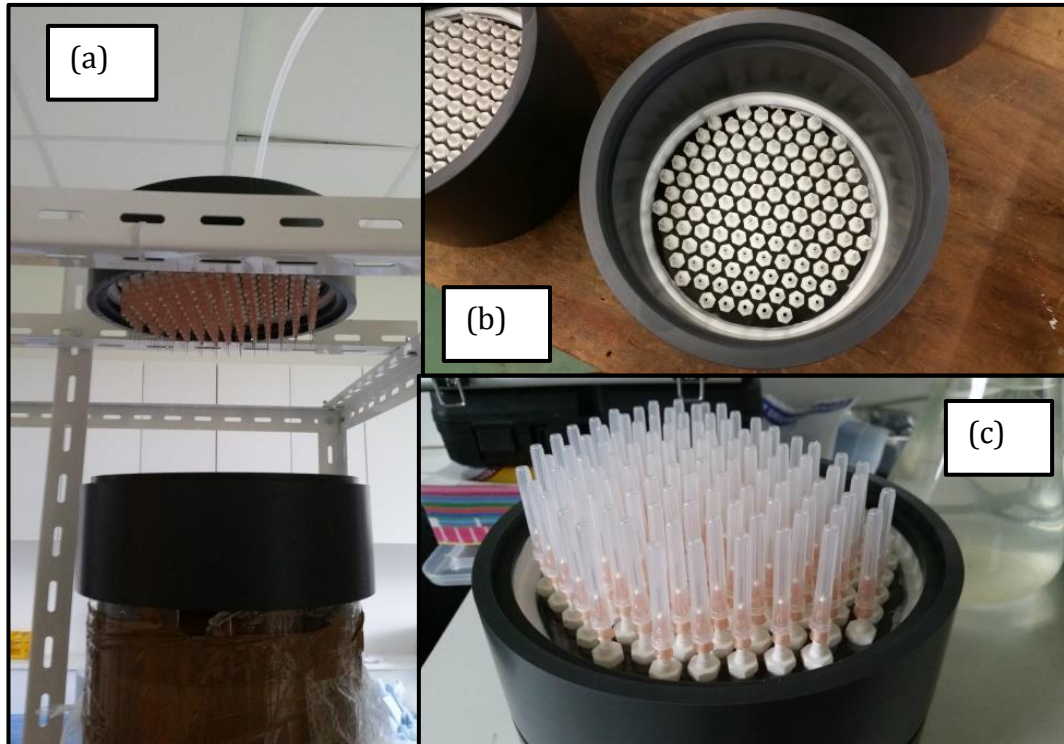


Figure 17: (a) simulateur de pluie, (b) maillage hexagonal, (c) aiguilles hypodermiques.

2.2.1.2 Cylindre

La colonne contenant le calcaire est un cylindre de plexiglass pré-percé pour l'installation des sondes de mesure de la teneur en eau et du potentiel de pression de l'eau dans la colonne (Annexe 5). Celui-ci peut être de deux diamètres externes prédéfinis différents (10 cm et 20 cm).

2.2.1.3 Base de la colonne

Le collecteur en PVC est l'élément sur lequel repose le montage. C'est une enceinte dans laquelle vient s'emboîter la colonne (Annexe 7). L'étanchéité est assurée par 2 joints toriques serrés par un anneau en aluminium (Annexe 6). Le contact hydraulique entre la base de la colonne de matériau et l'enceinte est assuré par une couche de bille de verre (50-90 μm) de 0,5 à 2 cm. Ce contact hydraulique est garant d'une condition de succion imposée à la base de la colonne, assurée par la différence d'élévation entre l'exutoire et la base de la colonne. Le fond de l'enceinte est légèrement en pente (5%) afin d'assurer l'écoulement du flux.

2.2.2 Méthode d'analyse des traceurs : HPLC

2.2.2.1 Choix des traceurs

Un traceur est un caractère spécifique ou toute substance solidaire d'un corps en mouvement, notamment de l'eau en déplacement, permettant de l'identifier et de décrire son mouvement. Ce caractère ou cette substance peuvent être naturellement présents ou artificiellement ajoutés (Castany et Margat, 1977).

Les traceurs choisis pour ce type de manipulation sont de deux types : un traceur inorganique, le bromure (apporté sous la forme de CaBr_2), et des traceurs organiques de la famille des fluorobenzoates (2,6-DFBA, et PFBA). Dissous dans l'eau, le CaBr_2 se trouve sous les formes ioniques Br^- et Ca^{2+} . La structure moléculaire des fluorobenzoates (Figure 18) se compose d'un cycle benzoïque plus ou moins saturé en fluor avec une fonction acide.

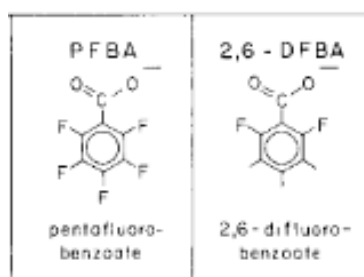


Figure 18: Structure moléculaire des fluorobenzoates PFBA et 2,6-DFBA, modifié de Bowman et Gibbons (1992)

Le 2,6 DFBA et PFBA ont un comportement proche du Br^- (Jaynes, 1994). Ces traceurs sont préalablement dissous dans une solution électrolytique de CaCl_2 à 5 mM.

2.2.2.2 Principe de l'HPLC

HPLC est l'acronyme de "*High performance liquid chromatography*" ou en français "chromatographie en phase liquide à haute performance". Cet appareil d'analyse permet de faire la séparation de molécules ou d'ions. Le temps de sortie de chaque substance est fonction de son affinité avec le solide constituant la colonne chromatographique. Chaque substance apparaîtra sous la forme d'un pic. L'aire du pic est directement corrélable avec la

concentration de la substance dans la solution injectée, après une calibration par une gamme d'étalonnage.

L'instrument d'analyse HPLC que nous avons utilisé est un Thermo Finnigan Spectra SYSTEM muni d'un détecteur UV. La colonne chromatographique est une IC-Pak Anion HC 4.6 x 150mm Column muni d'une précolonne Guard-Pack Pre-column Module (Waters). La phase mobile est une solution de 5 mM de KH_2PO_4 ajustée avec du H_3PO_4 à un pH de 2,83 (+/- 0.01) avec 60% d'acétonitrile (AcN). Le débit est maintenu à 2 mL/min. Ce protocole est modifié de Alletto et al. (2006).

Le four est à 30°C. Les deux longueurs d'onde de détection sont fixées à 195 et 205 nm. La valeur de 195 nm est une valeur de référence pour la détection du Br^- . Les valeurs de longueur d'onde pour détection des fluorobenzoates se trouvent entre 190-225 nm avec un optimum à 205 nm (Bowman, 1984; Bowman et Gibbons, 1992).

2.2.2.3 Calibration multi-traceurs

Des solutions filles de concentration 5 mg/L en DFBA, 50 mg/L en PFBA, 5 mg/L en CaBr_2 , 10mg/L en KNO_3 sont préparées à partir de solutions mères à 100 mg/L. Ces solutions sont diluées selon les facteurs de dilution suivants : 1/2, 1/4, 1/5, 1/10 et 1/20. La calibration se fait sur le chromatogramme obtenu par l'analyse UV à 195 nm pour le bromure et les fluorobenzoate (Figure 20).

Les courbes de calibration obtenues ont un coefficient de corrélation entre 0,991 et 0,9999 pour les 4 anions. L'intensité du pic obtenu est donc linéairement proportionnelle à la concentration du traceur présent en solution pour chacun des trois traceurs choisis (Figure 20).

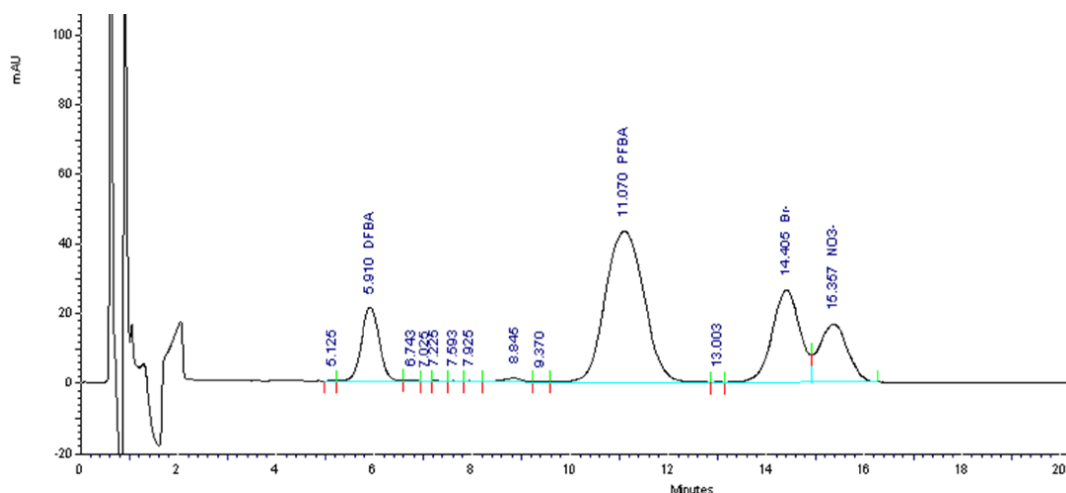


Figure 19 : Chromatogramme de la calibration multi-traceurs (DFBA, PFBA, Br) et d'un polluant naturellement présent (nitrate)

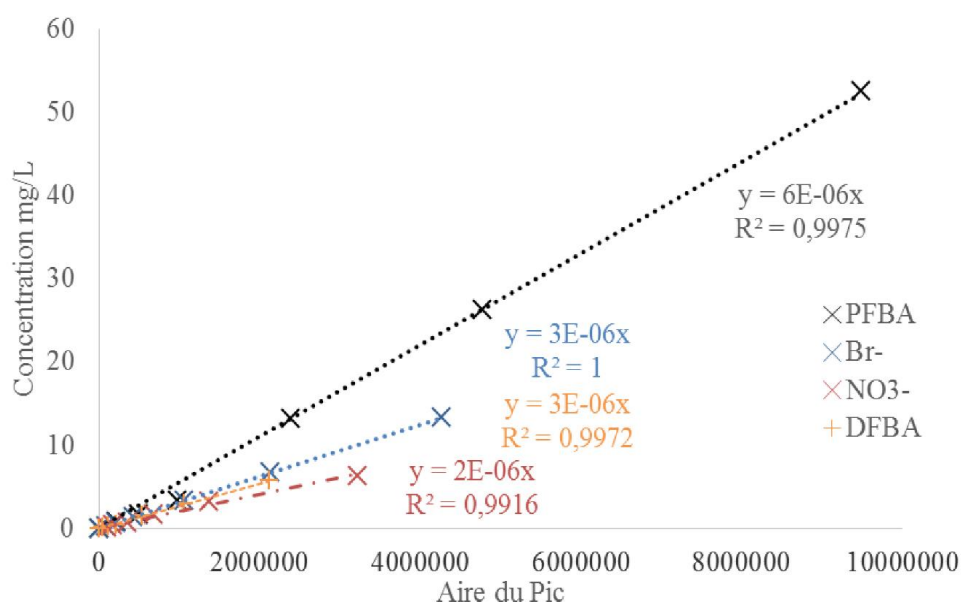


Figure 20: Courbe de calibration (Aire-Concentration) pour les trois traceurs (DFBA, PFBA, Br-)

Les pics des traceurs sont bien résolus pour toutes les concentrations testées.
La durée du programme est d'environ 20 minutes.

2.2.3 Instrumentation des colonnes

La colonne de calcaire est instrumentée sur toute sa hauteur avec deux capteurs de teneur en eau et trois capteurs de pression de l'eau (Figure 16).

Les sondes de teneur en eau sont des sondes ML3 Thetaprobe (Soil Moisture). Celles-ci émettent un champ électromagnétique dans la colonne et mesurent la permittivité de la colonne. Le contraste entre le sol, l'air et l'eau est important, après que l'eau ait été soumise à une polarisation par un champ électromagnétique. Les sondes sont installées à 10 et 20 cm depuis le sommet de la colonne. Les trous accueillant les tiges en acier de la sonde sont pré-percés.

Les sondes de pression se composent d'une canne souple de 30 cm avec une bougie poreuse de diamètre 6 mm et de 20 mm de long (SDEC) et d'un capteur de pression (SDEC Vacuomètre électrique). Elles sont installées 4, 15, 26 cm depuis le sommet de la colonne. Les trous pour accueillir les bougies sont pré-percés. Avant l'insertion, la bougie est enduite d'une épaisse pâte de limon pour assurer la continuité hydraulique entre le calcaire et la sonde.

Le débit est le rapport du volume de sortie de la colonne sur le temps de sortie de ce volume. Le volume d'eau en sortie de la colonne est suivi en pesant les fractions d'eau présents dans les tubes à essai du collecteur de fraction. Chaque position de tube à essai correspondant à une durée.

2.2.4 Mise en place des colonnes

2.2.4.1 Installation de la base

Avant l'insertion de la colonne de calcaire dans le dispositif, la colonne doit subir un aplanissement de sa base. La colonne est retournée (base vers le ciel), la base est délicatement dégagée de tous les éléments dépassant du niveau de la base à l'aide d'un couteau ou d'une spatule.

Pour assurer la continuité hydraulique entre la base de la colonne de matériau et le dispositif exutoire, la rugosité de la base est remplie par une pâte de billes de verre (50-90 μm) (Figure 21). Dans cette position, une toile en Inox Robusta (20 μm) préalablement saturée et découpée au diamètre de la colonne est installée sur la pâte de bille de verre. La base du dispositif est

ensuite installée. La colonne est enfin rebasculée (base vers le bas) pour être installée sur le portoir et instrumentée.

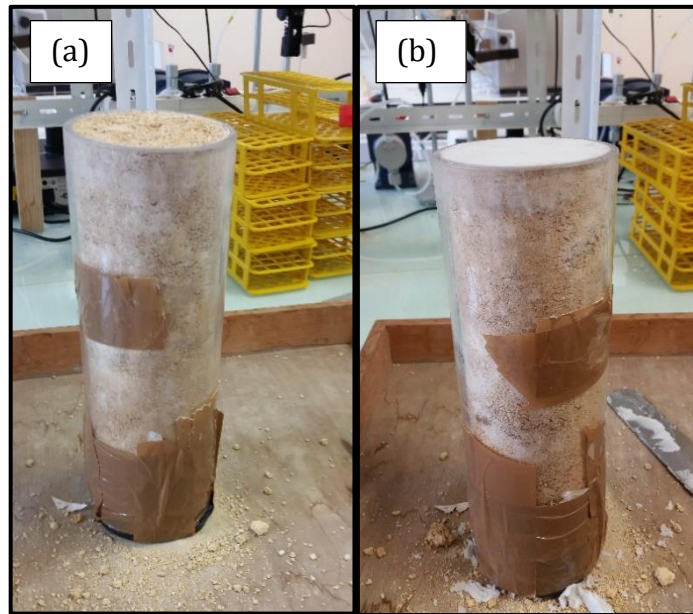


Figure 21: Préparation de la base de la colonne (colonne 3), (a) base de la colonne sans billes de verre, (b) base de la colonne remplie de billes de verre.

2.2.4.2 Continuité hydraulique

Avant toute tentative d'expérience, la continuité hydraulique au sein de la colonne doit être assurée. La colonne est saturée à faible débit par sa base. Une fois que la charge hydraulique à la base fait environ 5 cm, l'air est chassé par les buses et les buses sont condamnées. Le robinet en aval de la base est ouvert et l'eau s'écoule par succion jusqu'à l'exutoire.

2.2.5 Protocoles d'élution

2.2.5.1 Choix des intensités de précipitation

Les chroniques de précipitation de la station météorologique de Champhol Chartres nous montrent que la typologie des précipitations se répartit en trois groupes : des précipitations $> 1\text{mm}$ dont la fréquence avoisine les 10-15 jours par mois, des précipitations $> 5\text{ mm}$ dont la fréquence avoisine les 5-10 jours par mois, des précipitations $> 10\text{ mm}$ dont la fréquence avoisine les 0-3 jours par mois.

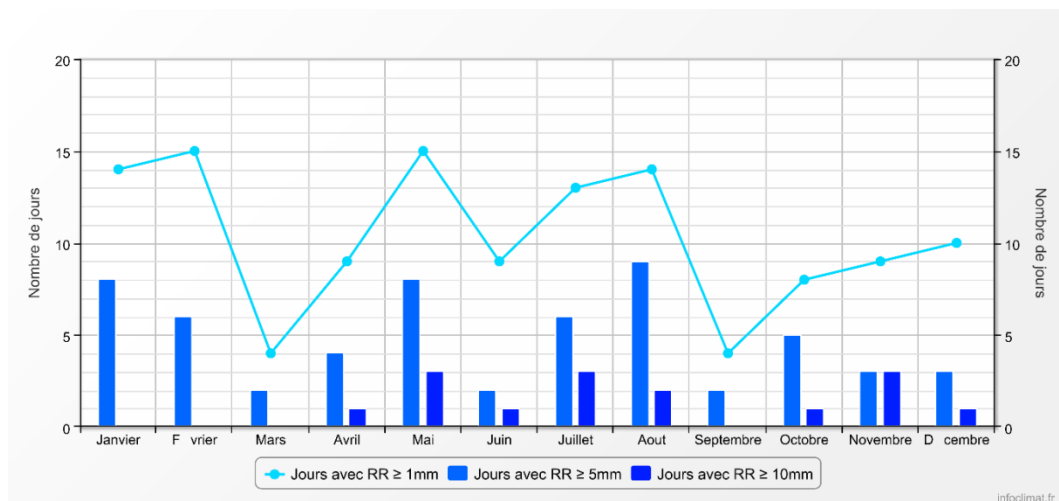


Figure 22: Réurrence de précipitation à CHARTRES pour 3 intensités de précipitation ($> 1\text{mm}$, $>5\text{mm}$, $>10\text{mm}$) pour l'année 2014. (Source : www.infoclimat.fr).

Pour imiter les densités de flux réelles, 3 intensités de pluie sont choisies. Ces intensités de pluie sont respectivement nommées Pf (env. 4 mm/h), pluie faible ; Pm (env. 8 mm/h), pluie moyenne ; Pi (env. 16 mm/h), pluie intense.

2.2.5.2 En régime permanent

Trois intensités de pluie (4 mm/h, 8 mm/h et 16 mm/h) sont imposées au sommet des colonnes. Après une vérification du régime permanent, un traceur (Br^- ou DFBA) est injecté durant 2 h à une concentration connue (1000 mg/L ou 250 mg/L). Après cette durée, la solution sans traceur est injectée avec un débit identique et constant jusqu'à la fin de l'expérience (Figure 23). Pour chaque intensité de pluie, l'expérience est réalisée 3 fois sur la même colonne, afin d'évaluer la reproductibilité des résultats.

La succion (-25 cm) à la base de la colonne, imposée par la différence de hauteur entre la surface d'eau dans l'exutoire et la hauteur de la base de la colonne (Figure 16), est invariante durant toutes les expériences et pour toutes les colonnes.

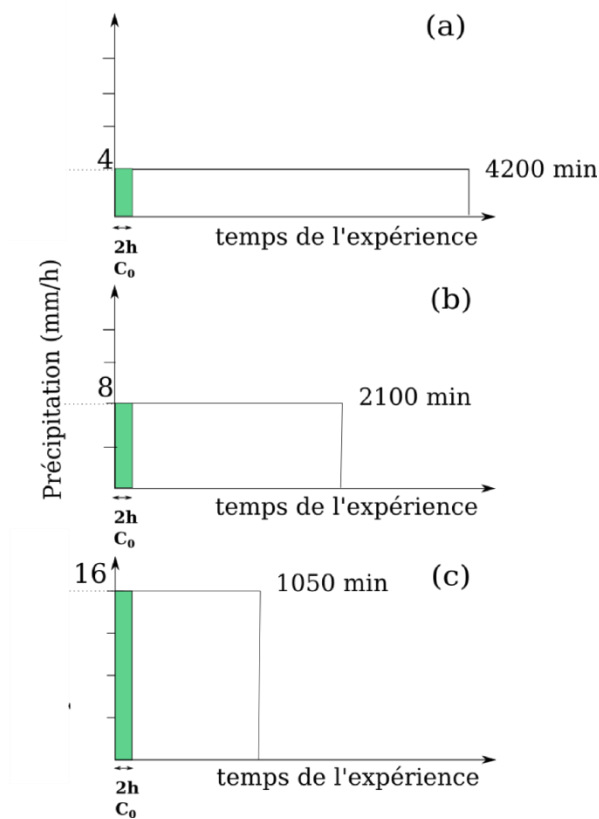


Figure 23 : Protocole d'injection pour la réalisation des expériences régime permanent pour les trois intensités de précipitation (4 mm/h, 8 mm/h, et 16 mm/h).

2.2.5.3 En régime transitoire

2.2.5.3.1 Protocole d'injection en régime transitoire : interruption de flux

Pour mettre en évidence des phénomènes de transport hors équilibre physique de type MIM, des expériences d'interruption de flux ont été réalisées sur les mêmes colonnes selon un protocole proche des expériences en régime permanent. Le flux est injecté à une concentration de 250 mg/L. Après 2h, la solution sans traceur est injectée avec un débit identique pendant un temps égal au temps de sortie du maximum d'intensité du pic observé pour le régime permanent équivalent. Le flux est subitement stoppé et reprend 7 jours après l'injection de la concentration C_0 (Figure 24).

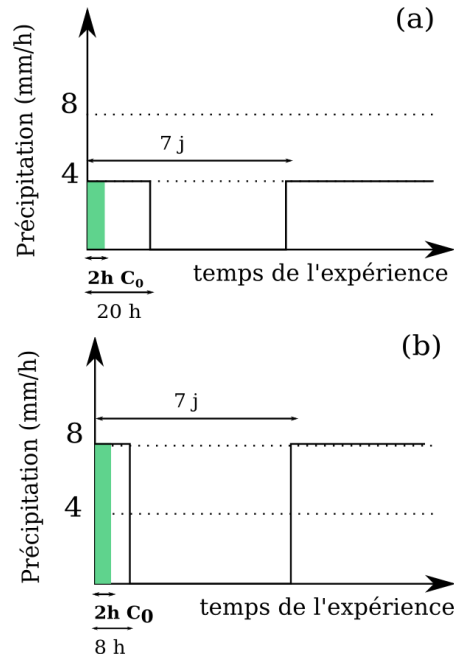


Figure 24: Protocole d'injection pour la réalisation des régimes transitoires avec interruption de flux.

2.2.5.3.2 Protocole d'injection en régime transitoire : interruption de flux avec drainage

Pour évaluer l'effet du drainage de la colonne et de la reprise du flux d'eau sur la mobilité du soluté, des expériences de drainage ont été réalisées sur les mêmes colonnes selon un protocole proche des expériences en régime transitoire type interruption de flux. Le flux est injecté avec une concentration de 250 mg/L. Après 2h, la solution sans traceur est injectée avec un débit identique pendant un temps égal au temps de sortie du maximum d'intensité du pic observé pour le régime permanent équivalent. Le flux est subitement stoppé et reprend 7 jours après l'injection de la concentration C_1 avec un débit égal à la première période ou différent (Figure 25). Pendant cette période, la succion à la base de la colonne est maintenue, ce qui entraîne un flux de drainage. A la reprise du flux d'entrée, une nouvelle concentration C_0 d'un autre traceur est injectée pour observer comment s'effectue le transport d'un soluté dans un milieu préalablement drainé, par rapport au traceur injecté en régime permanent.

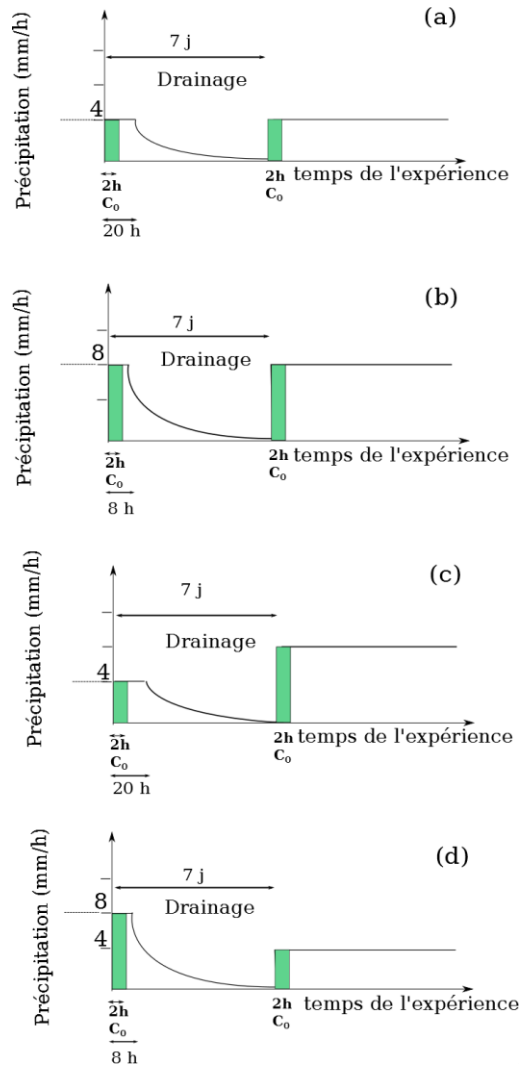


Figure 25: Protocole d'injection pour la réalisation des régimes transitoires de drainage.

2.2.6 Analyse des courbes de percée

2.2.6.1 Courbes de percée

Pour chacune des expériences, les courbes de percée obtenues sont présentées en concentration (en mg/L) en fonction du temps (en min).

Pour comparer les résultats, les courbes de percée sont aussi présentées en concentration normée (C_e/C_0), C_0 étant la concentration de la solution d'injection, en fonction de l'eau cumulée en sortie de colonne (lame d'eau en cm).

2.2.6.2 Estimation des paramètres de transport

Les courbes de percée obtenues pour les régimes permanents et transitoires (interruption de flux) sont analysées avec STANMOD (Simunek et al., 2008) qui est un logiciel qui permet d'estimer les paramètres de transport dans le cas d'expérimentations en régime permanent en 1D. L'ajustement inverse réalisé par STANMOD (Toride et al., 1999) permet de déterminer les paramètres de transport du modèle choisi en minimisant la différence entre la simulation et les observations par la méthode des moindres carrés. Deux modèles sont utilisés pour expliquer les courbes : l'équation de convection-dispersion (CDE) (Eq. 33)) où le modèle de transport de type MIM (Eq.35) (Eq.36), dans leur forme adimensionnelle. L'équation de convection-dispersion s'écrit dans sa forme adimensionnelle :

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} \quad (\text{Eq.43})$$

Tableau 2: Grandeurs adimensionnelles pour l'équation de convection dispersion

Grandeurs	T	Z	P	C
Expressions	$\frac{Vt}{L}$	$\frac{z}{L}$	$\frac{VL}{D_e}$	$\frac{C}{C_0}$

où P est le nombre de Peclet.

$$\beta \frac{\partial C_m}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C_m}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_m}{\partial Z} - \omega (C_m - C_{im}) \quad (\text{Eq.44})$$

$$(1 - \beta) \frac{\partial C_{im}}{\partial T} = \omega (C_m - C_{im}) \quad (\text{Eq. 45})$$

Tableau 3: Grandeurs adimensionnelles pour le modèle de transport MIM

Grandeurs	C_m	C_{im}	β	ω
Expressions	$\frac{C_m}{C_0}$	$\frac{C_{im}}{C_0}$	$\frac{\theta_m}{\theta}$	$\frac{\alpha L}{\theta v}$

STANMOD permet d'estimer le coefficient de partitionnement β (θ_m/θ) et le coefficient de transfert de masse ω ($\alpha L/\theta v_m$, avec L, longueur caractéristique, ici, la longueur de la colonne : 30 cm).

2.3 Caractérisation des colonnes

2.3.1 Protocole de traçage au bleu brillant et démontage de la colonne

2.3.1.1 La molécule Bleu brillant

Le Bleu brillant (FCF) est un composé chimique de couleur bleu-foncé. Il est utilisé dans l'agroalimentaire comme colorant (E 133) (Figure 26).

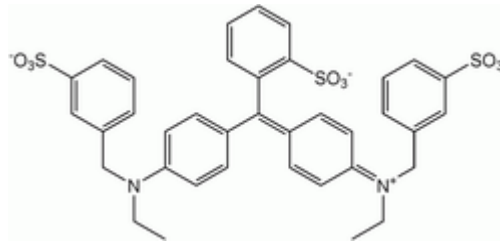


Figure 26: Formule de la molécule de bleu brillant (E133)

Le Bleu Brillant FCF (BB) a été utilisé sur de nombreux types de sol, et a montré sa fiabilité comme traceur de l'eau (Aeby et al., 1997 ; Schwartz et al., 1999). Celui-ci est très visible dans le sol. Il est peu toxique et stable dans une grande gamme de pH et de force ionique (German-Heins et al., 2000 ; Flury et Flühler, 1994 ; 1995), excepté pour de faibles concentrations pour lesquelles son adsorption non linéaire devient importante (Kasteel et al., 2002 ; Kasteel et Burkhart, 2005).

2.3.1.2 Injection du bleu brillant

Après stabilisation jusqu'à l'état permanent, une solution de Bleu Brillant d'une concentration de 6 g/L est injectée au sommet de la colonne pendant 2 h à un débit de 2 mL/min. Après cette période de deux heures, le traceur est remplacé par une solution de CaCl_2 à 5 mM. Avec le même débit, cette solution est injectée pendant 18 h. Le flux d'entrée est interrompu 20 h après l'injection, et la colonne est drainée par sa base soumise à une succion de -25 cm pendant 12 h, puis -50 cm les 12 h suivantes.

2.3.1.3 Plan d'échantillonnage dans la colonne

La colonne est découpée en 5 tronçons aux profondeurs 6, 12, 18, 24 cm depuis le sommet. Sur chacune de ces sections sont réalisées une description lithologique et une photographie.

Pour effectuer la découpe, un poids est placé au sommet de la colonne. Le pourtour du cylindre en plexiglass est découpé à 90 % avec une meuleuse à disque diamant. Une plaque en acier coupante est intercalée par percussion dans la fente dessinée par la découpe. Le poids au sommet de la colonne maintient la structure du sol dans la couche supérieure (Figure 27).



Figure 27: Photographie de la réalisation du protocole de découpe des colonnes.

Un cylindre (dia interne : 38 mm ; h : 20 mm) en acier pour la mesure de rétention en eau est prélevé à partir de la couche supérieure nouvellement découpée. En fonction du nombre de lithologies présentes dans cette couche, des micro-colonnes (dia : 12 mm ; h : 40 mm) équipées de micro préleveurs sont échantillonnées par percussion (Figure 28).

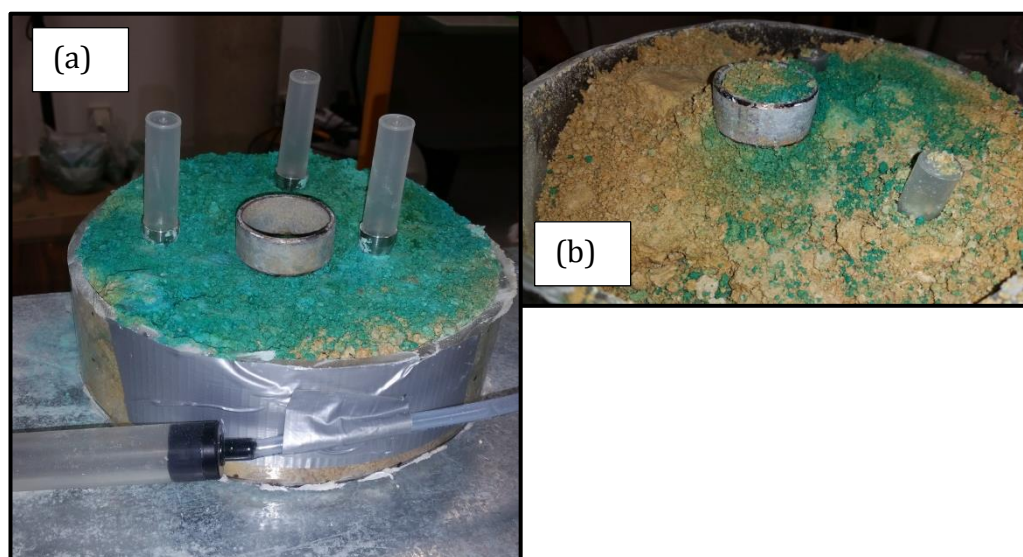


Figure 28: (a) Photographie du plan d'échantillonnage dans la colonne (8) lors du protocole de découpe ; (b) prélèvement dans la colonne (8).

2.3.2 Méthode d'analyse : spectrophotométrie

2.3.2.1 Principe de la spectrophotométrie

La spectrophotométrie est une méthode analytique quantitative qui consiste à mesurer l'absorbance d'une matière. Les mesures sont faites avec un spectrophotomètre SpectroDirect (Tintometer-Group).

2.3.2.2 Calibration

Une solution fille de 30 mg/L est créée à partir d'une solution mère de 6 g/L avec un facteur de dilution 20. Cette solution fille est encore diluée selon les facteurs de dilution suivant : 1/2, 1/4, 1/5, 1/10, 1/20. Ces 6 solutions permettent d'obtenir la courbe de calibration (Figure 29). Un balayage spectral de 400-900 nm permet d'obtenir la longueur d'onde d'absorbance maximum du BB (633 nm).

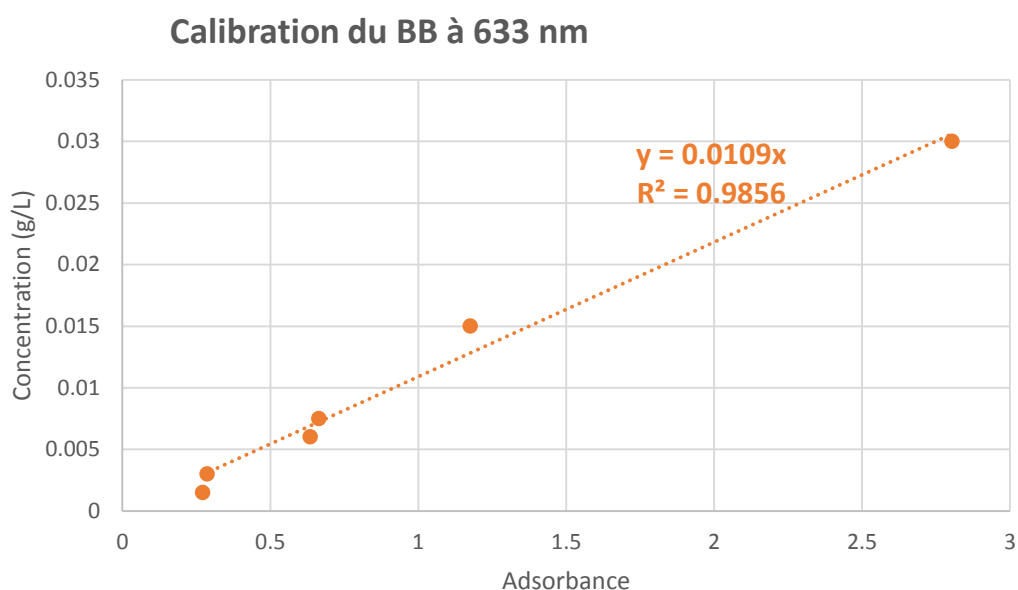


Figure 29: Courbe de calibration (Absorbance-Concentration) de la méthode de dosage par spectrophotométrie.

2.3.3 Caractérisation physique de la colonne

2.3.3.1 Teneur en eau

Lors de la découpe de la colonne, l'ensemble du matériel est récolté couche par couche. Les échantillons sont pesés après découpe puis séchés pendant 24h à 105° C dans une étuve. La différence de masse entre l'échantillon sec et l'échantillon humide rapporté à la masse de l'échantillon sec donne la teneur en eau d'échantillon (kg.kg^{-1}). La teneur en eau au sein de la colonne est établie couche par couche.

2.3.3.2 Granulométrie

Ces mêmes échantillons une fois secs sont envoyés dans un laboratoire d'analyse où ils subissent un tamisage pour obtenir les proportions d'éléments grossiers ($> 2 \text{ mm}$) et d'éléments fins ($< 2 \text{ mm}$). Puis les fractions fines sont différenciées par tamisage ou sédimentation pour obtenir la proportion en poids dans chaque classe granulométrique (sables grossiers entre $2000 \mu\text{m}$ et $200 \mu\text{m}$, sables fins entre $200 \mu\text{m}$ et $50 \mu\text{m}$, limons grossiers entre $50 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$, limons fins entre $20 \mu\text{m}$ et $2 \mu\text{m}$, argiles inférieure à $2\mu\text{m}$).

2.3.4 Caractérisation de la porosité des sous-échantillons des colonnes

2.3.4.1 Tomographie des micro-colonnes

Sur chaque section découpée, une ou plusieurs micro-colonnes (dia : 12 mm ; h : 40 mm) ont été prélevées en fonction des lithologies présentes dans la section. Ces micro-colonnes sont passées au X-ray microtomographe (Nanotom) équipé d'un tube à rayons X 180 kV/15W avec une précision mécanique de 1,2 μm .

La tomographie est une technique d'imagerie qui permet de reconstruire le volume d'un objet en 3D à partir d'une série de scan 2D. L'échantillon est soumis à des rayons X à partir d'un point source. Les rayons incidents (qui traversent l'échantillon) sont enregistrés par une surface à l'opposé du point d'entrée. Le procédé est répété avec un angle de rotation différent pour chaque acquisition. L'ensemble des acquisitions pour chaque angle permet de reconstruire un objet en 3D. Cette méthode est régulièrement utilisée depuis les années 2000 pour observer la structure du sol (Pierret et al., 1999 ; 2002 ; Capowiez et al., 2011).

2.3.4.2 Porosimétrie au mercure

Lors de l'échantillonnage des couches de calcaire dans la colonne, une partie du vrac prélevé est destinée à l'analyse de la porosité par porosimétrie au mercure. Les échantillons sont séchés pendant au moins 24 h dans une étuve à 105° C.

Le porosimètre Micrometrics Autopore IV 9500 est utilisé pour caractériser la porosité des matériaux prélevés en appliquant différents niveaux de pression pour un échantillon plongé dans le mercure (Fiès et Bruand, 1998). La grande variabilité des matériaux oblige à utiliser plusieurs cellules choisies selon la pulvérulence de l'échantillon. Les cellules de 5 cc Solid, 3 cc Powder et 5 cc Powder ont été utilisées.

2.3.4.3 Rétention en eau

La courbe de rétention hydrique donne une estimation de capacité du sol à retenir l'eau. La courbe de rétention hydrique est la relation entre le potentiel matriciel et la teneur en eau du sol (§1.2.1.4.3).

Lors de la découpe de la colonne, des cylindres (Dia interne: 38 mm ; H : 20 mm) ont été prélevés par percussion. Les cylindres sont saturés puis soumis à différentes pressions d'air (azote) dans une presse de Richards (pF 1; 1,5; 2; 2,5; 2,95 et 4,2). A chaque palier de pression, les échantillons sont pesés. La teneur en eau du sol peut être exprimée sur une base massique (rapport entre la masse d'eau et la masse du sol sec). Les dimensions du cylindre permettent d'obtenir les teneurs en eau volumiques.

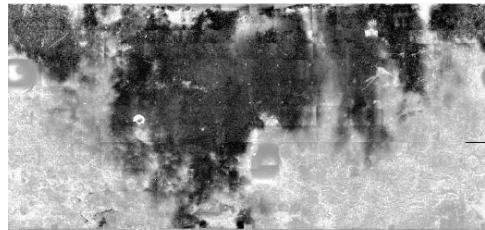
2.3.5 Cartographie de la présence de bleu brillant par analyse d'image

La cartographie du BB est obtenue par analyse d'image. Les photographies sont obtenues avec des paramètres fixes (1/160 ; F4,5 ; ISO 800) sous un éclairage fixe avec un PENTAX K-30 équipé d'un objectif macro TAMRON 90 mm avec un filtre polarisant. Le filtre polarisant permet d'atténuer les reflets du plexiglass. Les 176 macro-clichés sont des images RGB (3 canaux) qui ont été réalisées sur l'ensemble du pourtour du cylindre à intervalles réguliers (17 +/- 1 photographie pour un pourtour). Les photographies sont ensuite rassemblées en une unique photographie sous ENVI (Exelis). Le rapport du canal rouge (valeur de 0-255 dans le spectre du rouge) sur le canal vert (valeur de 0-255 dans le spectre du vert) permet d'extraire le BB (Vogel et al., 2006). L'image est segmentée avec un seuillage de 1 (Figure 30). Le même procédé est utilisé pour chaque section de découpe.



Photographie reconstruite

assemblage de 176 macro-clichés



Suivis du Bleu Brillant

Rapport

R (Band Rouge)/G (Band Vert)



Cartographie du Bleu Brillant

Segmentation d'image

Seuil = 1

Figure 30: Méthodologie du traitement d'image pour le suivi du Bleu Brillant.

2.4 Modélisation : impact du lit de billes de verre sur les courbes d'élution

2.4.1 Obtention des paramètres

2.4.1.1 pour les billes de verre

2.4.1.1.1 Essai de perméabilité à charge variable

La conductivité hydraulique à saturation, K_s , des billes de verre est obtenue expérimentalement. Un lit de billes de verre de 2 cm est étalé au fond d'une base de colonne (dia : 20cm). Une toile inox est disposée à la surface des billes pour éviter toute mise en suspension des billes lors de l'immersion. Dix centimètres d'eau sont ajoutés d'un coup, puis la décroissance de la hauteur d'eau est enregistrée en fonction du temps. Le K_s obtenu est la moyenne du K_s obtenu sur 6 essais de 10 min.

2.4.1.1.2 Courbe de $\theta(h)$ des billes de verres

Dix cylindres de diamètre interne de 2,6 cm et d'une hauteur de 2,6 cm sont remplis de billes de verre. Celles-ci sont saturées pendant 24 h au bac à sable.

La courbe $\theta(h)$ est obtenue par 5 paliers de pression (pF 0,4; 1; 1,5; 1,85 et 2). Chaque palier de pression fait l'objet d'une stabilisation d'au moins 6 h.

2.4.1.2 pour le calcaire

Les paramètres pour le calcaire sont obtenus à partir des échantillons prélevés lors de la découpe des colonnes (§ 2.3.4.3).

2.4.2 Stratégie d'optimisation des paramètres

2.4.2.1 Ajustement $\theta(h)$

Les mesures de $\theta(h)$ réalisées sur les échantillons des colonnes 6 et 8 et sur les billes de verre sont ajustées avec le logiciel RETC (van Genuchten et al., 1991). Ce logiciel gratuit permet l'analyse de la rétention en eau des sols et de la conductivité hydraulique dans les sols non saturés. L'ajustement sous RETC permet d'obtenir les paramètres de forme (n et α) de van Genuchten et al. (1980). Le paramètre θ_s est obtenu expérimentalement. La teneur en eau à saturation est obtenue par pesée après saturation des cylindres au bac à sable durant 24 h. Le paramètre θ_s est fixé à la valeur expérimentale durant l'optimisation de n et α . θ_r est fixé d'après la forme de la courbe de $\theta(h)$.

2.4.2.2 Estimation de $K(h)$

Les phases de drainage réalisées pendant l'interruption de flux (§2.2.5.3.2) permettent d'obtenir une estimation de $K_{moy}(h)$ de la colonne par la méthode dite « one-step outflow » (Kool et al., 1985 ; Parker et al., 1985). Le potentiel total au niveau du tensiomètre situé à 4 cm de profondeur ('top') est utilisé pour calculer un gradient de charge entre le sommet et la base de la colonne au cours du temps pour 6 dates depuis le début du drainage (t_0 à 0 min depuis l'interruption de flux, t_{26} à 26 min depuis l'interruption de flux, t_{51} à 51 min depuis l'interruption de flux, t_{106} à 106 min depuis l'interruption de flux, t_{201} à 201 min depuis l'interruption de flux, t_{1075} à 1075 min depuis l'interruption de flux). La valeur de potentiel matriciel est lue par la sonde tensiométrique à - 4 cm du sommet de la colonne. La succion à la base de la colonne ($z = - 30$ cm) est imposée à - 25 cm.

2.4.2.3 Double optimisation de $\theta(h)$ et $K(h)$

Pour contraindre davantage les paramètres, la conductivité hydraulique à saturation a fait l'objet d'une double optimisation sous RETC. Les courbes de $\theta(h)$ et $K_{\text{moy}}(h)$ ont été ajustées simultanément avec le même jeu de paramètres. Chaque K_s a été optimisé pour chaque combinaison entre les différents scénarios de drainage et les relations $\theta(h)$ obtenues sur les différents échantillons prélevés dans la colonne. L'ensemble de ces optimisations permet d'obtenir une gamme de variabilité de K_s .

2.4.2.4 Optimisation des courbes de récession du débit

Les moyennes des K_s , α et n obtenus par la double optimisation de $\theta(h)$ et de $K(h)$ sont utilisées dans une simulation inverse sous HYDRUS-1D pour reproduire les courbes de récession de débit mesurées lors des phases de drainage. θ_s est laissé fixé aux valeurs obtenues expérimentalement. Une couche de lit de billes de verre de 2 cm est ajoutée entre les profondeurs -28 et -30 cm.

2.4.3 Simulation sous HYDRUS-1D

Les simulations sous HYDRUS-1D (Simunek et al., 2009) sont réalisées pour les régimes permanents à faible intensité de précipitation pour expliquer la variabilité des courbes de percée observées à cette intensité. Les paramètres moyens de K_s , α et n pour le calcaire obtenus lors de l'optimisation des paramètres pour les phases de drainage sont utilisés dans ces simulations. Pour les billes de verre, le paramètre K_s a été obtenu expérimentalement et les paramètres α et n ont été obtenus par optimisation sous RETC de la courbe de $\theta(h)$. Les paramètres θ_s pour le calcaire et les billes de verres utilisés sont les moyennes des valeurs obtenues expérimentalement par pesées. Cette simulation utilise l'équation de convection-dispersion classique. La dispersion est prise égale à la moyenne des trois valeurs de dispersion estimées sous STANMOD pour les régimes permanents à faible intensité de précipitation. La dispersion des billes de verre est fixée à 1 cm.

2.4.4 Evaluation du modèle

La pertinence des simulations est évaluée par la bonne retranscription des courbes de percée. Puis dans un second temps, la pertinence des simulations se fait sur le rapprochement des valeurs simulées aux valeurs expérimentales des courbes de rétention en eau.

2.5 Expériences de traçage sur le terrain

2.5.1 Traçage à l'ion bromure

La partie expérimentale sur le terrain a été réalisée dans le cadre du projet CHARTREAU en collaboration avec Myriam Dedewanou (Post-Doctorante à l'ISTO).

2.5.1.1 Echantillonnage

2.5.1.1.1 Façonnage du site

L'expérience de traçage a eu lieu sur le site du lycée de la Saussaye (5 km à l'est de Chartres). Sur ce site, la formation du Calcaire de Beauce affleure et ne fait que quelques mètres (4 m) d'épaisseur. Il s'agit de la limite extrême au nord-ouest du Calcaire de Beauce. Une fosse de 4 m de long (x), 1,60 m de profondeur (z) et 1 m dégagement (y) est creusée dans le Calcaire de Beauce, donnant accès à la ZNS. Le sol d'une épaisseur de 30-40 cm a été décapé au préalable sur le sommet de la fosse ($4 \times 1 \text{ m}^2$). La zone non saturée se compose d'un calcaire blanc/ocre, extrêmement meuble, composé principalement de CaCO_3 (Coquet et al., 2007). La fosse se compose principalement de deux parties distinctes : une partie avec un calcaire blanc relativement homogène, et une seconde partie avec un calcaire ocre très hétérogène comportant de nombreux éléments grossiers (cailloux).

2.5.1.1.2 Méthode d'échantillonnage des eaux du sol : bougies poreuses

Les bougies poreuses (SDEC) sont constituées d'une tête de céramique poreuse montée sur un tube en plastique de 1 m de long fonctionnant comme une chambre de mise en dépression. Pour cette expérimentation, le diamètre

de la céramique est de 31 mm (150 mm de long). Ce dispositif permet de prélever de l'eau du sol pour la mesure des concentrations résidentes.

2.5.1.1.3 Plan d'échantillonnage

Le principe consiste à pré-percer le front de la fosse à l'aide d'une perceuse équipée d'un foret (dia 30 mm) de 1 m à différentes profondeurs et à y disposer les bougies poreuses (Figure 31).

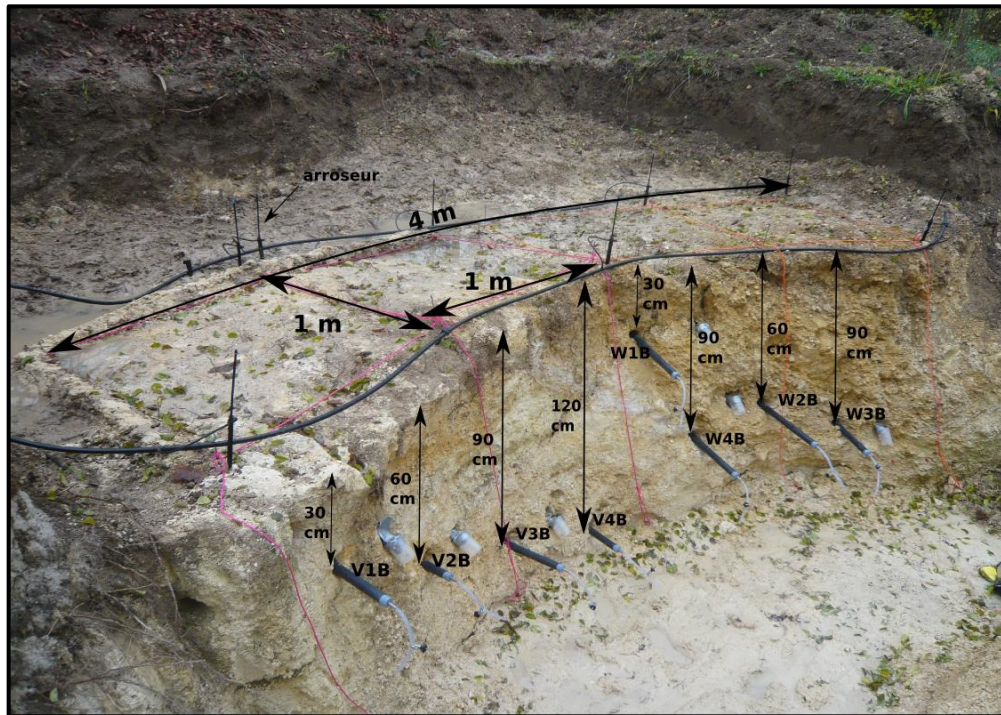


Figure 31 : Prélèvement des eaux de la zone non saturée à l'aide de bougies poreuses

Tableau 4 : Caractérisation lithologique des points de prélèvement

Nom des bougies poreuses	Profondeur par rapport au niveau décapé	Lithologie au droit des bougies poreuses
V1B	30	Calcaire Blanc
V2B	60	Calcaire Ocre
V3B	90	Calcaire Blanc/Ocre
V4B	120	Calcaire Blanc
W1B	30	Calcaire Ocre
W2B	60	Calcaire Ocre
W3B	90	Calcaire Ocre

2.5.1.2 Protocole d'injection

Trente litres (30 L) de Br⁻ d'une concentration de 5 g/L soit une masse de 225 g est injectée sur la surface décapée de la fosse sous la forme d'un pulse. La surface de la fosse est irriguée de façon homogène à une intensité de précipitation de 0,14 mm/h (cas d'une aspersion considérée comme continue) avec des arroseurs automatiques pendant toute la durée de la restitution du bromure (2 semaines).

Le système d'arrosage, mis en place par le biais d'un programmeur et de buses d'aspersion, a permis un apport en eau homogène. Cet apport est tel que la surface de la zone expérimentale ne soit pas en condition de saturation. Le programmeur a permis de réguler la fréquence de l'arrosage. L'eau arrive par intermittence (5 s tous les 3 min) avec une intensité de précipitation de 5,0 mm/h. L'homogénéité de l'arrosage a été vérifiée, à plusieurs reprises, sur une durée de 15 mn, afin de s'assurer du volume d'eau apporté et de l'efficacité de la technique.

2.5.1.2.1 Estimation du débit (Q)

Le volume obtenu durant le prélèvement et la fréquence des prélèvements des bougies poreuses permet d'estimer un débit. Cette estimation repose sur plusieurs hypothèses :

- L'eau collectée dans les bougies correspond à une emprise au sol autour de la céramique poreuse. Le diamètre de la céramique est de 3,1 cm. L'emprise de prélèvement est imaginée comme une sphère de 72 cm de diamètre.
- La maille d'injection de l'eau et du traceur est de 1 m²
- Le rapport de la maille d'injection (1 m²) sur la section de prélèvement de la bougie poreuse (40 cm²) permet de définir un coefficient égal à 250.
- Le débit estimé multiplié par le coefficient de 250 permet d'estimer le débit sur un m²

$$Q(t) = Q(t)_{\text{bougie poreuse}} \times Coef \quad (\text{Eq. 46})$$

2.5.1.2.2 Masse totale restituée (M)

L'estimation du débit permet d'estimer également les masses de traceur restituées.

$$M = \sum C(t) Q(t) dt \quad (\text{Eq. 47})$$

Où :

- $C(t)$ est la concentration mesurée au temps t [M/L]
- $Q(t)$ est le débit estimé par m² au temps t [L/T]
- dt est la durée du prélèvement [T]
- M est la masse total restituée [m]

2.5.1.3 Analyse des eaux par chromatographie ionique

La chromatographie ionique est une méthode physicochimique de séparation des espèces (ions) présentes dans un échantillon. Cette technique est rapide

(entre 5 et 10 minutes), avec une limite de détection faible (0,5 mg/L). Quelques millilitres sont nécessaires pour réaliser la mesure.

2.5.1.4 Interprétation des courbes

Les courbes des restitutions sont interprétées dans un premier temps avec STANMOD à l'aide des modèles CDE ou MIM selon leur forme, afin d'en extraire les caractéristiques de vitesse et de dispersion hydrodynamique du Br.

2.5.2 Traçage au Bleu Brillant

2.5.2.1 Injection

Trente litres (30 L) de Bleu Brillant FCF d'une concentration de 6 g/L (Vogel et al., 2006 ; Flury et Wai, 2003) est ensuite injectée à la surface de la fosse sous la forme d'un pulse (Figure 32). La surface de la fosse est irriguée de façon homogène pendant 66 h à une intensité de précipitation de 0,14 mm/h avec des arroseurs automatiques.

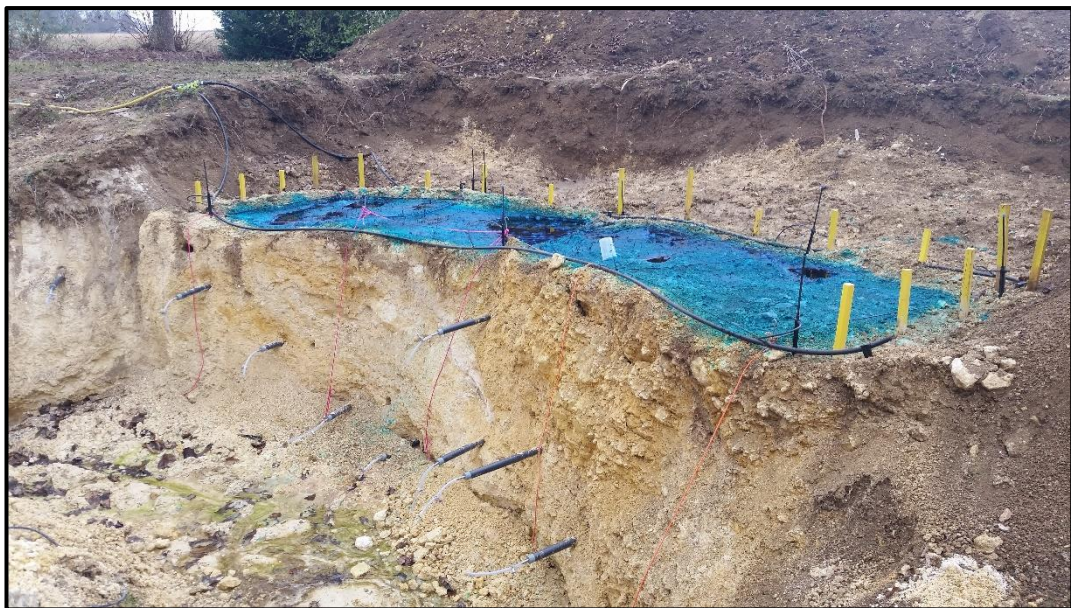


Figure 32: Temps T_0 après l'injection de Bleu Brillant sur l'ensemble de la surface.

2.5.2.2 Plan d'échantillonnage

Pour observer le front d'écoulement au sein du volume calcaire, celui-ci a été découpé de façon régulière (Wang et al., 2006, 2009). Quatre profils (0, 33, 66, 100 cm depuis le bord vertical de la fosse selon la direction y) ont été

réalisés à travers ce volume (respectivement à 66 h, 70 h, 72 h, 90 h depuis le début de l'irrigation) (Figure 33). Pour chaque profil ont été réalisées une photographie et une cartographie précise des lithologies.

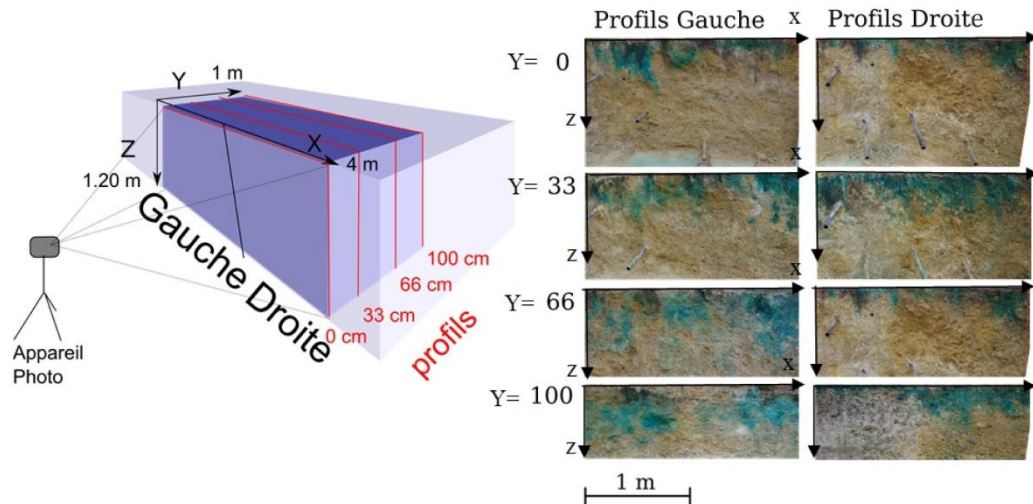


Figure 33: Protocole de découpe de la fosse (gauche), clichés bruts obtenus pour les différents profils (0, 33, 66, 100 cm) (droite)

2.5.2.3 Caractérisation des lithologies

2.5.2.3.1 Granulométrie

Quatre matériaux identifiables ont été prélevés avant la destruction de la fosse pour faire une caractérisation granulométrique avec et sans décarbonatation, ainsi qu'une mesure de leur teneur en carbone organique.

2.5.2.3.2 Porosimétre au mercure

Avant la destruction de la fosse les matériaux majeurs ont été échantillonnés. Le plan d'échantillonnage est présenté sur la Figure 89 (16, 15, 14, 13) à l'occasion de la présentation des résultats. L'analyse de la porosité se fait comme présentée au §2.3.4.2.

2.5.2.3.3 Infiltrométrie à disques

Une série de mesures à l'aide d'infiltromètres à disque a été réalisée à différents potentiels matriciels (-1, -2, -5 cm) avant toute perturbation du milieu sur les lithologies accessibles à partir du sommet de la fosse pour obtenir des estimations des valeurs de conductivité hydraulique à saturation.

Les mesures ont été interprétées avec la méthode multipotentiel de Ankeny et al. (1991) (Coquet et al., 2000).

2.5.2.4 Traitement d'image : analyse du bleu brillant

2.5.2.4.1 Cartographie de la présence du bleu brillant

Les photographies ont été réalisées en lumière naturelle. La luminosité était peu variable sur la durée de l'expérience, puisque celle-ci a été réalisée sous un couvert nuageux hivernal (février 2015). L'appareil photo est disposé sur un trépied à une distance d'environ 2 m du bord de la fosse (Figure 34). Un cliché est réalisé pour chaque profil. Les canaux rouge (intensité lumineuse du spectre dans le rouge) et vert (intensité lumineuse du spectre dans le vert) ont été utilisés pour détecter le bleu brillant (BB) sans estimation de la concentration (Forrer et al., 2000 ; Kasteel et al., 2007). Les photographies ont été recodées en format RGB 0-255. Le pixel est considéré comme affecté par le bleu brillant si :

$$r/g < 0,96$$

avec r, canal 0-255 dans la bande du rouge, g, canal 0-255 dans la bande du vert (Vogel et al., 2006 ; Weiler et Flühler, 2004). Le seuillage est obtenu par expertise visuelle. L'image ainsi obtenue donne la répartition spatiale du BB pour chaque profil.

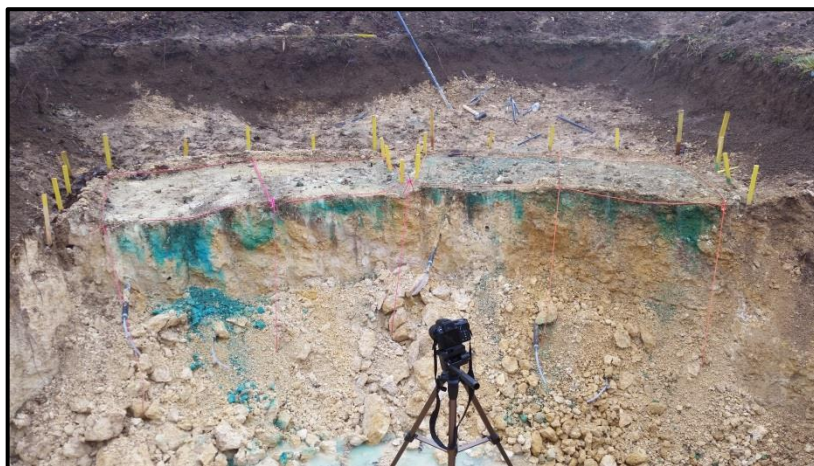


Figure 34: Photographie de la disposition de l'expérience lors de découpe de la fosse

2.5.2.4.2 Analyse de la dispersion spatiale

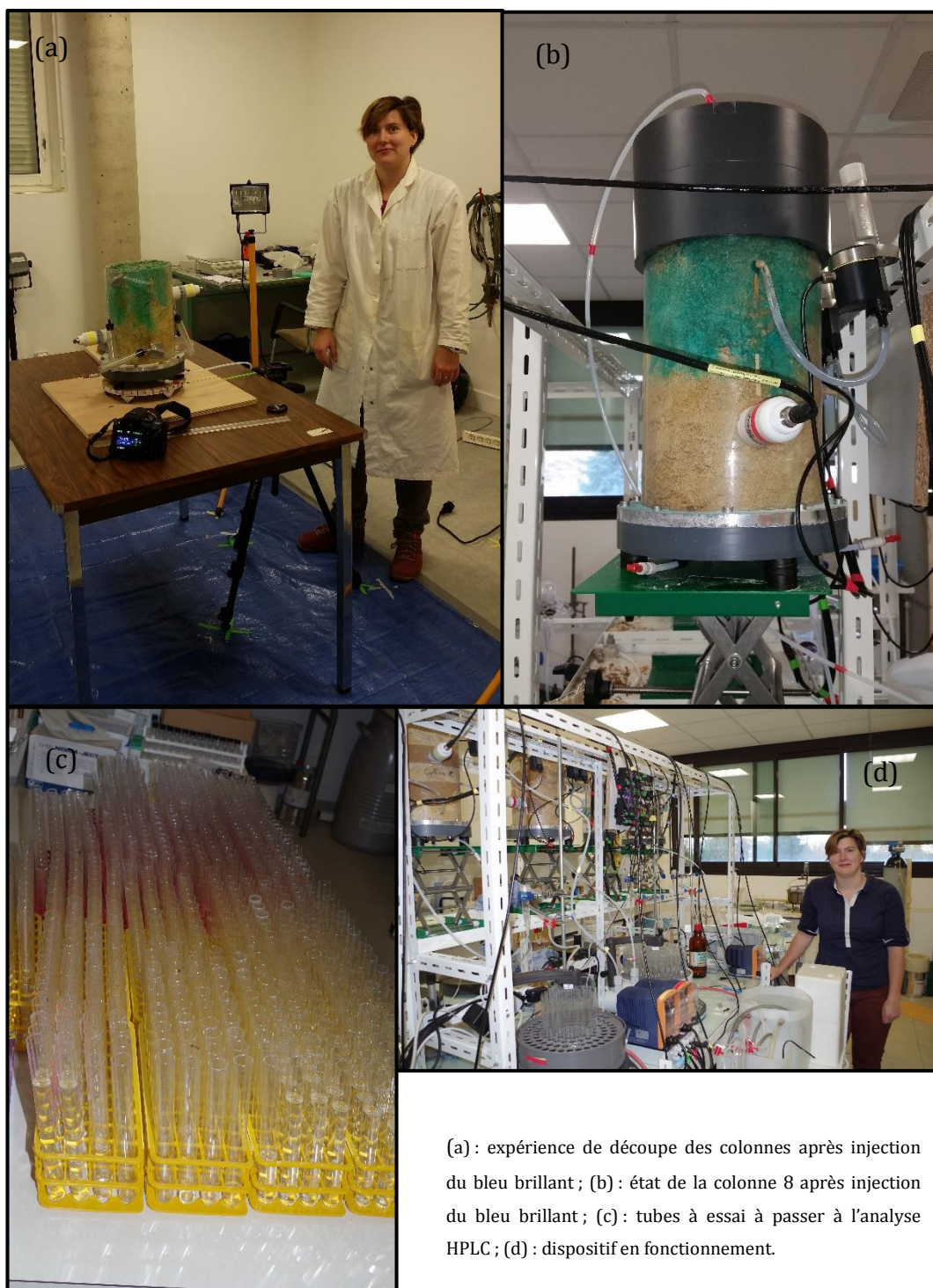
2.5.2.4.2.1 Analyse à l'échelle du profil (x,z)

La proportion de pixels affectés par le BB est comptabilisée pour obtenir le pourcentage de recouvrement de BB en fonction de la profondeur (Flury et al., 1994). La couverture de BB est calculée comme le rapport du nombre de pixels affectés par le présence de BB sur le nombre de pixels total à une profondeur donnée en pourcentage pour chaque profondeur.

2.5.2.4.2.2 Analyse à l'échelle du profil (y,z)

Les profils sont subdivisés en colonne de 25 cm de large. Le recouvrement de BB pour chaque colonne en fonction de la profondeur donne la profondeur maximum de pénétration du bleu brillant (Öhrström et al, 2002). Cette approche pour les différents profils (0, 33, 66, 100 depuis le bord de la fosse) permet une analyse de la dispersion selon les axes y,z de la fosse.

3 Chapitre 3 : Résultats des expériences en laboratoire



3.1 Résultats des expériences d'élution sur colonnes en régime permanent

Cette partie présente dans le détail une partie des courbes de percées obtenues pour les deux colonnes de l'étude (6 et 8) pour l'intensité de précipitation la plus faible (4 mm/h). Les courbes de percées pour les intensités de précipitation plus importante (8 et 16 mm/h) sont présentées en annexe. Les ajustements STANMOD de l'ensemble des courbes de percées permettent l'interprétation des écoulements et l'obtention des paramètres de vitesse et de dispersion au sein de chacune des colonnes.

3.1.1 Les courbes de percée

3.1.1.1 Colonne 6 : de type homogène

3.1.1.1.1 Faible intensité (4 mm/h) : « Temps de crachin »

Les expériences d'élution sont réalisées dans l'ordre chronologique.

La première courbe de percée obtenue pour la colonne 6 (Figure 35) montre un pic étroit, avec un maximum de concentration relative de 0,16. La lame d'eau (V_m), correspondant à la lame d'eau sortie à la moitié de l'intégrale de l'aire sous la courbe est égale à 6,35 cm, soit une teneur en eau moyenne mobile de 21,2 % (Tableau 5). Le taux de restitution est bon (98 %). Le débit, obtenu par pesée des fractions d'eau en sortie de colonne, est globalement stable (4,2 mm/h) avec de petites interruptions ou des artéfacts provenant d'un mauvais fonctionnement du collecteur de fraction. Les arrêts du débit en sortie provenant d'une avarie en entrée sont suivis par des fluctuations du potentiel matriciel. Celui-ci a une moyenne de -18,3 cm et la teneur en eau de la colonne a une moyenne de 0,243 cm³.cm⁻³. L'ajustement CDE simule les données observées avec un R^2 de 0,96.

La seconde courbe de percée (Figure 36) ressemble à la précédente, mais avec un décalage des concentrations vers la droite. Le maximum du pic de concentration relative est de 0,17 et le V_m est de 6,63 cm soit une teneur en eau moyenne mobile de 22,1 % . Le temps d'élution est plus important 937 min (Tableau 5). Le taux de restitution est de 98 %. Une panne du collecteur

de fraction n'a pas permis de suivre le maximum du pic de concentration. La teneur en eau moyenne est de $0,244 \text{ cm}^3.\text{cm}^3$ et le potentiel matriciel moyen est de $-16,5 \text{ cm}$. L'ajustement CDE ne semble pas satisfaisant au vu du manque de données décrivant le maximum de pic de concentration. Pourtant, il simule les données expérimentales avec un R^2 de 0,96.

Cette dernière courbe de percée (Figure 37) ne ressemble pas aux deux précédentes. Le maximum du pic de concentration relative (0,1) est moins important et se trouve en retard ($V_m = 9,53 \text{ cm}$) (Tableau 5) et la courbe s'étire rallongeant la queue d'élution. Le taux de restitution du traceur est bon (95%). Le débit de sortie reste stable (3,9 mm/h) hormis à 3000 minutes où le débit de sortie devient nul à cause d'une avarie sur le débit d'entrée. Cet arrêt se répercute sur la teneur en eau, qui affiche par ailleurs une moyenne de $0,241 \text{ cm}^3.\text{cm}^3$ et sur le potentiel matriciel qui a une moyenne de $-16,7 \text{ cm}$. Ces valeurs sont constantes avant l'injection du traceur. Cette interruption de flux accidentel ne semble pas perturber la queue d'élution. L'ajustement CDE simule les données expérimentales avec un R^2 de 0,95.

Tableau 5: Résumé des grandeurs suivies durant les expériences d'élution de la colonne 6 pour une faible intensité de précipitation (4 mm/h).

N° essai	V_m	Temps d'élution	Densité de flux	Taux.Rest	h_m moy	θ moy	θ estimé*
	(cm)	(min)	(mm/h)	(%)	(cm)	(%)	(%)
1	6,35	817	4,20	98	-18,3	24,3	21,2
2	6,63	937	4,00	98	-16,5	24,4	22,1
3	9,53	1447	3,90	95	-16,7	24,1	31,7

* θ estimé : V_m/L , en supposant un écoulement convectif dispersif pur

Le Tableau 5 résume les grandeurs observées durant les expériences d'élution. Le V_m est proche pour les essais 1 et 2, mais les V_m pour l'essai 3 est très important. Cette valeur est incohérente puisque la teneur en eau estimée avec un V_m de 9,53 serait de 31,7 %, nettement supérieure à la teneur en eau moyenne mesurée. L'essai 3 présente un effet retard important et révèle un écoulement qui n'est certainement pas de type convectif dispersif pur, ce qui fausse l'estimation de la teneur en eau.

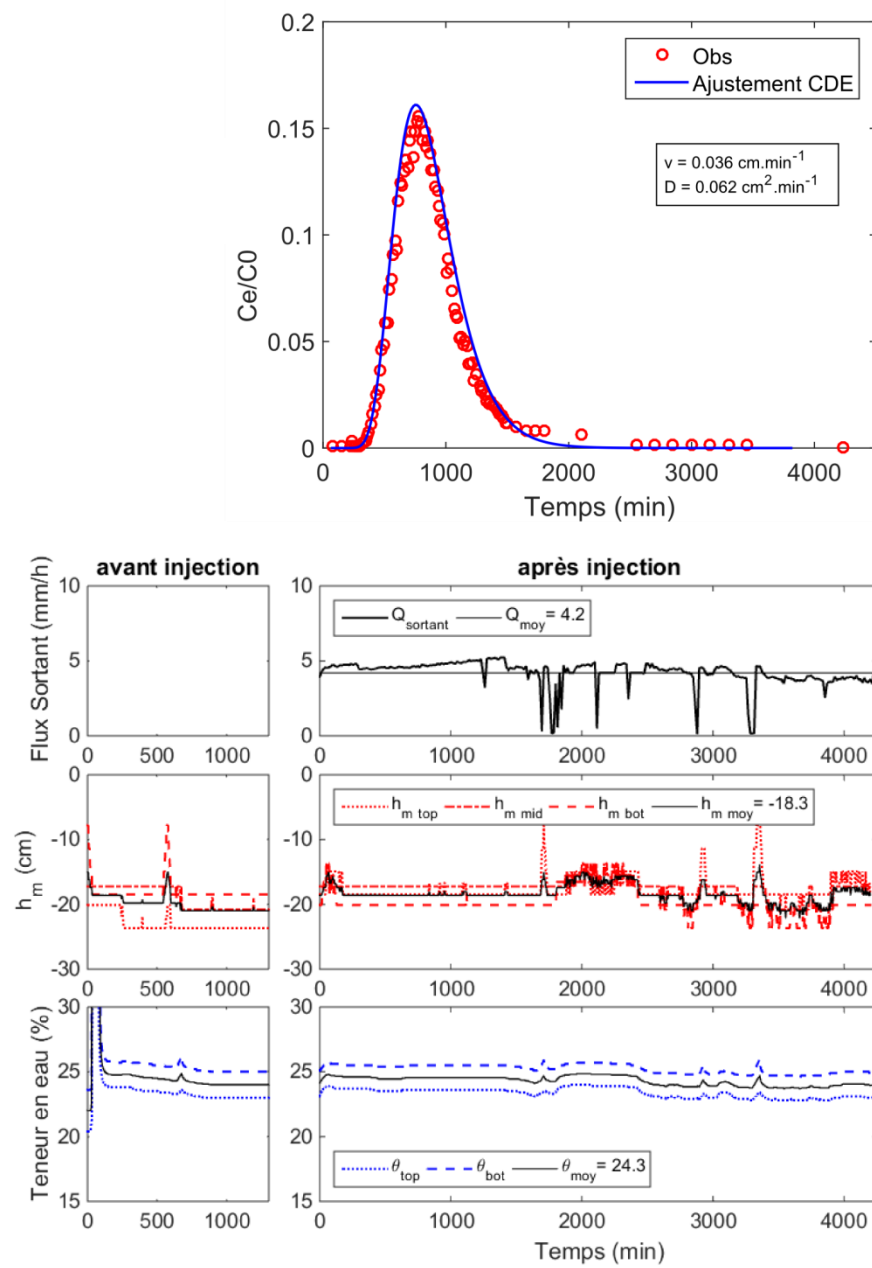


Figure 35: Courbe de percée ajustée à l'équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°1 sur la colonne 6 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col6PER1).

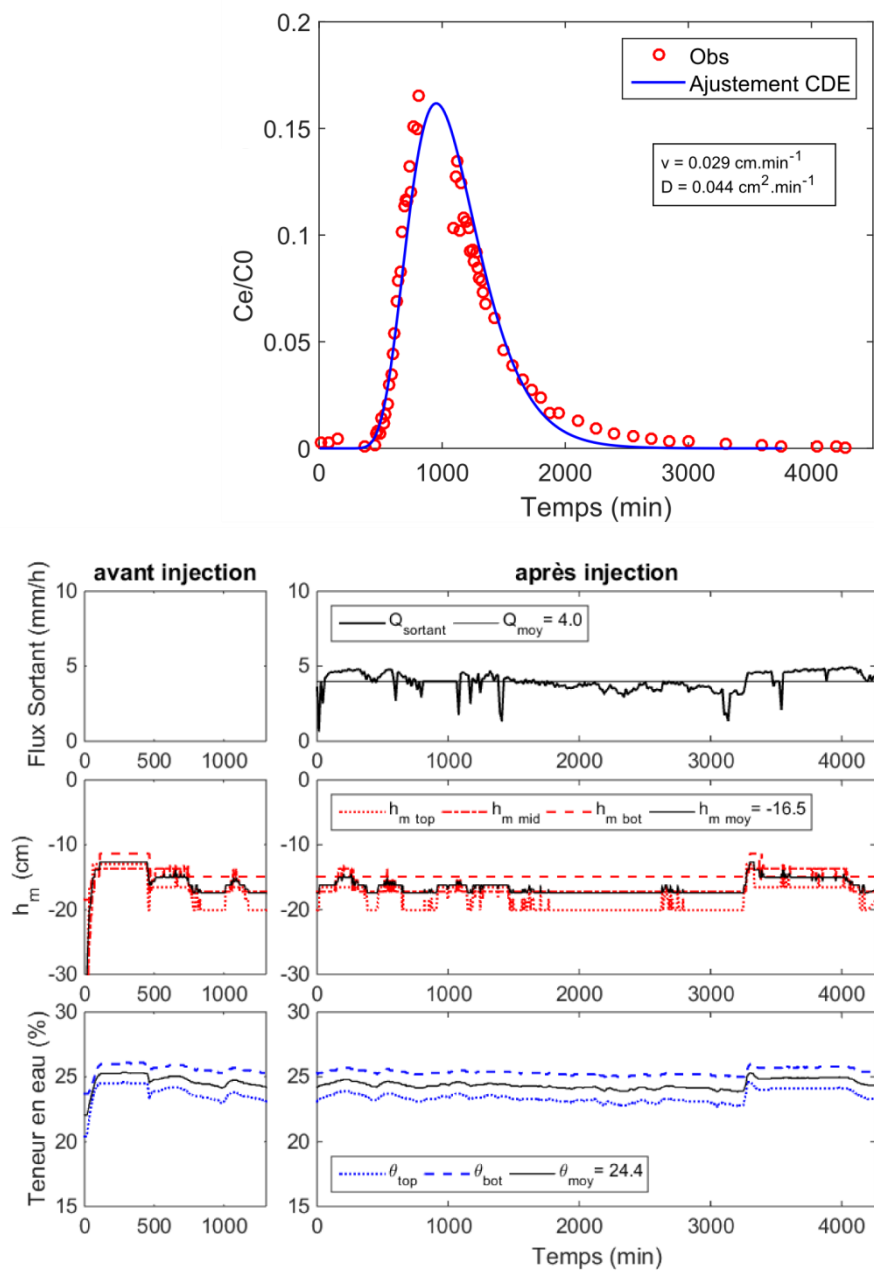


Figure 36: Courbe de percée ajustée à l'équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°2 sur la colonne 6 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col6PER2).

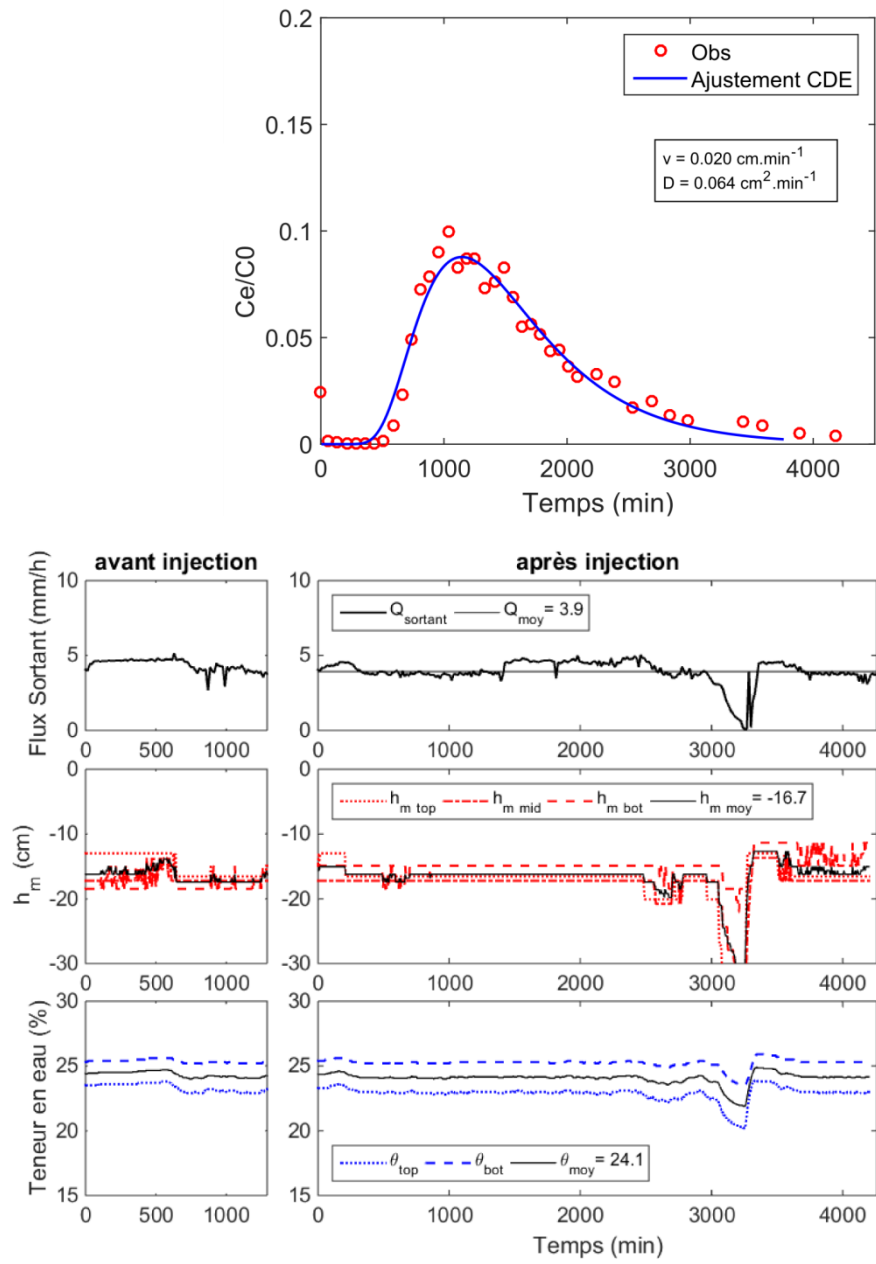


Figure 37: Courbe de percée ajustée à l'équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°3 sur la colonne 6 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col6PER3).

3.1.1.1.2 Intensité moyenne (8 mm/h) : « Temps de chien »

Tableau 6: Résumé des grandeurs suivies durant les expériences d'élution de la colonne 6 pour une intensité moyenne de précipitation (8 mm/h).

N° essai	V _m	Temps d'élution	Densité de flux	Taux.Rest	h _m moy	θ moy	θ estimé*
	(cm)	(min)	(mm/h)	(%)	(cm)	(%)	(%)
4	7,05	573	7,8	83	-12,6	25,4	23,5
5	7,51	573	7,7	98	-10,3	26,0	25,0
6	6,63	480	8,4	76	-13,1	26,0	21,8

*θ estimé : V_m/L, en supposant un écoulement convectif dispersif pur

Pour les courbes de percées à 8 mm/h de la colonne 6, les courbes ont des tracés proches (Annexe 8 à 10). Le Tableau 6 résume les résultats de ces expériences. Les taux de restitution sont moins bons que les taux sur les expériences précédentes (à 4 mm/h). Les arrêts réguliers des collecteurs de fraction peuvent être à l'origine de cette baisse de la restitution de la concentration. L'ensemble des grandeurs suivies reste stable sur l'ensemble des expériences. Les valeurs de teneur en eau estimées à l'aide de V_m sont cohérentes avec les valeurs mesurées dans la colonne. Les temps d'élutions sont proches pour les trois essais. Les courbes sont ajustées avec une CDE, avec des R² au-dessus de 0,95.

3.1.1.1.3 Forte intensité (16 mm/h) : « Temps à tomber des cordes »

Tableau 7: Résumé des grandeurs suivies durant les expériences d'élution de la colonne 6 pour une forte intensité de précipitation (16 mm/h).

N° essai	V _m	Temps d'élution	Densité de flux	Taux.Rest	H _m moy	θ moy	θ estimé*
	(cm)	(min)	(mm/h)	(%)	(cm)	(%)	(%)
7	8,40	306	16,5	94	-6,2	29,9	28,0
8	8,37	306	16,0	82	-4,5	31,6	28,2
9	8,31	324	15,4	80	-3,8	32,7	27,7

*θ estimé : V_m/L, en supposant un écoulement convectif dispersif pur

Pour les courbes de percée à 16 mm/h de la colonne 6, les courbes ont des tracés proches (Annexe 11 à 13), les V_m et les temps d'élutions sont également proches. Le Tableau 7 résume les résultats de ces expériences. La teneur en eau augmente légèrement au cours des trois expériences. Cette augmentation des teneurs en eau se traduit par une baisse de la pression matricielle au sein de la colonne. Les teneurs en eau estimées sont cohérentes avec les teneurs en eau mesurées. L'écart observé entre les valeurs mesurées et estimées pourrait être interprétés comme de l'eau ne participant pas à l'écoulement. La courbe de percée issue de l'essai 8 est ajustée avec une CDE alors que les courbes de percées pour les essais 7 et 9 sont ajustées avec un modèle de transport MIM.

3.1.1.2 Colonne 8

3.1.1.2.1 Faible intensité (4 mm/h) : « Temps de crachin »

La première courbe de percée (Figure 38) pour la colonne 8 à une intensité de précipitation de 4 mm/h montre un pic fortement asymétrique avec une pente ascendante très abrupte avec un maximum de concentration relative de 0,11 et un V_m de 5,5 cm. La queue d'élution est prononcée et persiste quasiment jusqu'à la fin de l'expérience. Le taux de restitution est de 98 %. Le débit moyen est de 3,9 mm/h avec un décrochement vers 2900 min. Cette faiblesse de la pompe arrive tard dans l'expérience et n'influence pas la restitution de la courbe. La baisse du débit est suivie par un décrochement des valeurs du potentiel matriciel (moyenne -7,8 cm) et un décrochement des valeurs de teneurs en eau (moyenne 0,191 cm³.cm⁻³). Les teneurs en eau et potentiels matriciels sont stables avant l'injection du traceur. L'ajustement MIM simule les points expérimentaux avec un R^2 de 0,98.

La seconde courbe de percée (Figure 39) pour l'intensité de précipitation de 4 mm/h montre un pic aplati avec une queue d'élution très prononcée. Le maximum de concentration (0,09) est atteint pour un V_m de 10,54 cm. Le taux de restitution est de 96 %. Le débit moyen est de 3,5 mm/h avec un décrochement de la pompe à 2000 minutes. Cette chute de débit est suivie par un décrochement du potentiel matriciel (moyenne -9,9 cm) et de la

teneur en eau (moyenne $0,190 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Cette interruption de débit intervient en fin d'expérience, sur la phase descendante de la restitution du traceur et peut expliquer le plateau de concentration observé entre 2000 et 3000 minutes. Les teneurs en eau et potentiels matriciels sont stables avant l'injection du traceur. L'ajustement MIM simule les observations avec un R^2 de 0,93.

La troisième courbe percée (Figure 40) pour l'intensité de précipitation de 4 mm/h montre un pic aplati à pente douce avec une queue d'élution visible. Le maximum de concentration (0,09) est atteint pour V_m de 8,57 cm. Le taux de restitution est de 83 %. Le débit moyen est de 3,8 mm/h, la teneur en eau moyenne est de $0,193 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ et le potentiel matriciel est de - 5,9 cm. Ces grandeurs sont stables avant l'injection. L'ajustement MIM simule les observations avec un R^2 de 0,98.

Tableau 8: Résumé des grandeurs suivi durant les expériences d'élution de la colonne 8 pour une faible intensité de précipitation (4 mm/h).

N° essai	V_m	Temps d'élution	Densité de flux	Taux.Rest	h_m moy	θ moy	θ estimé*
	(cm)	(min)	(mm/h)	(%)	(cm)	(%)	(%)
1	5,50	847	3,90	98	-7,8	19,1	18,3
2	10,54	1672	3,50	96	-9,9	19,0	35,1
3	8,57	1372	3,80	83	-5,9	19,3	28,6

* θ estimé : V_m/L , en supposant un écoulement convectif dispersif pur

Le Tableau 8 résume les caractéristiques des différentes expériences. Les V_m sont très variables, ce qui engendre des différences importantes entre les teneurs en eau estimées et mesurées. Cet écart confirme que le transport n'est pas de type convectif dispersif, les courbes de percée de l'essai 2 et 3 sont affectées par un effet retard qui peut être lié au MIM.

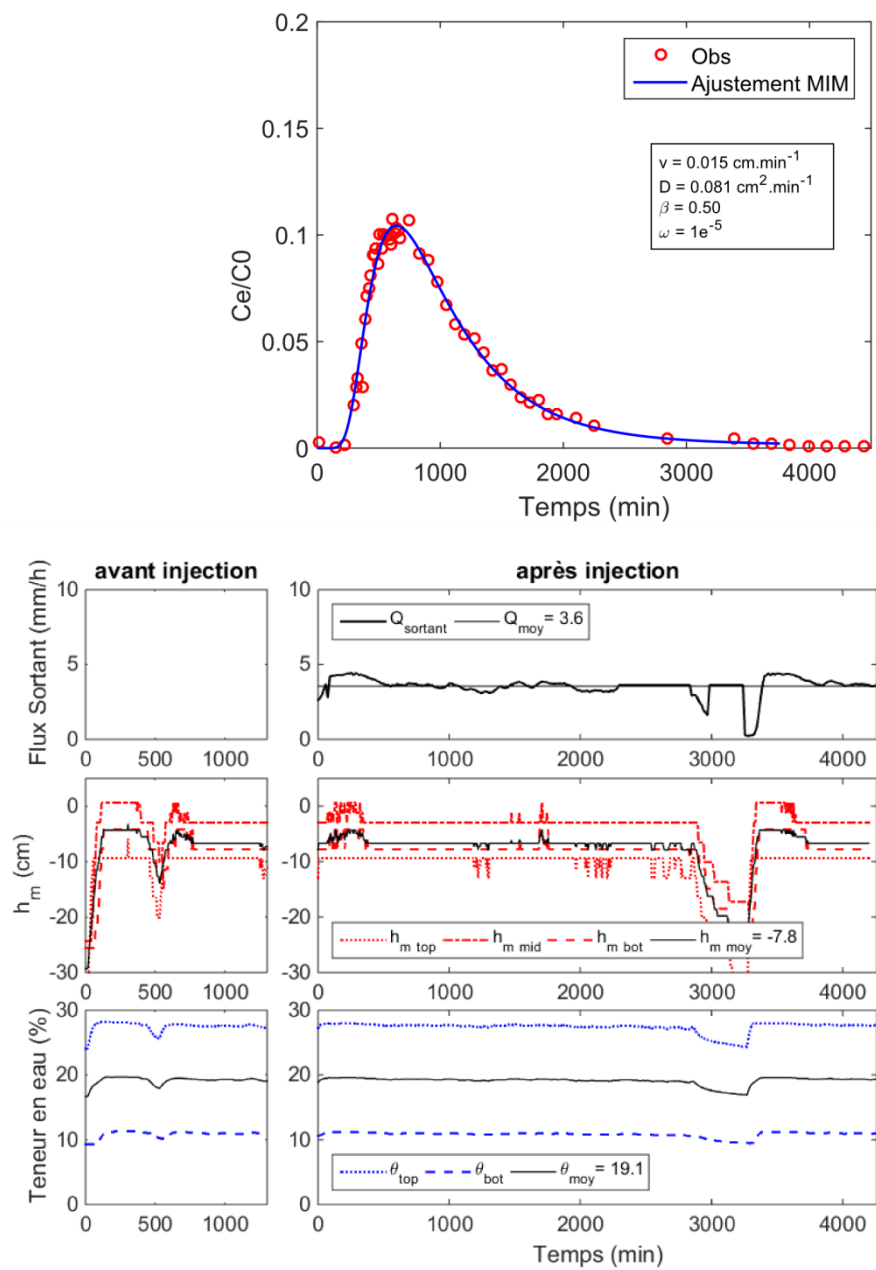


Figure 38: Courbe de percée ajustée à l'équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°1 sur la colonne 8 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col8PER1).

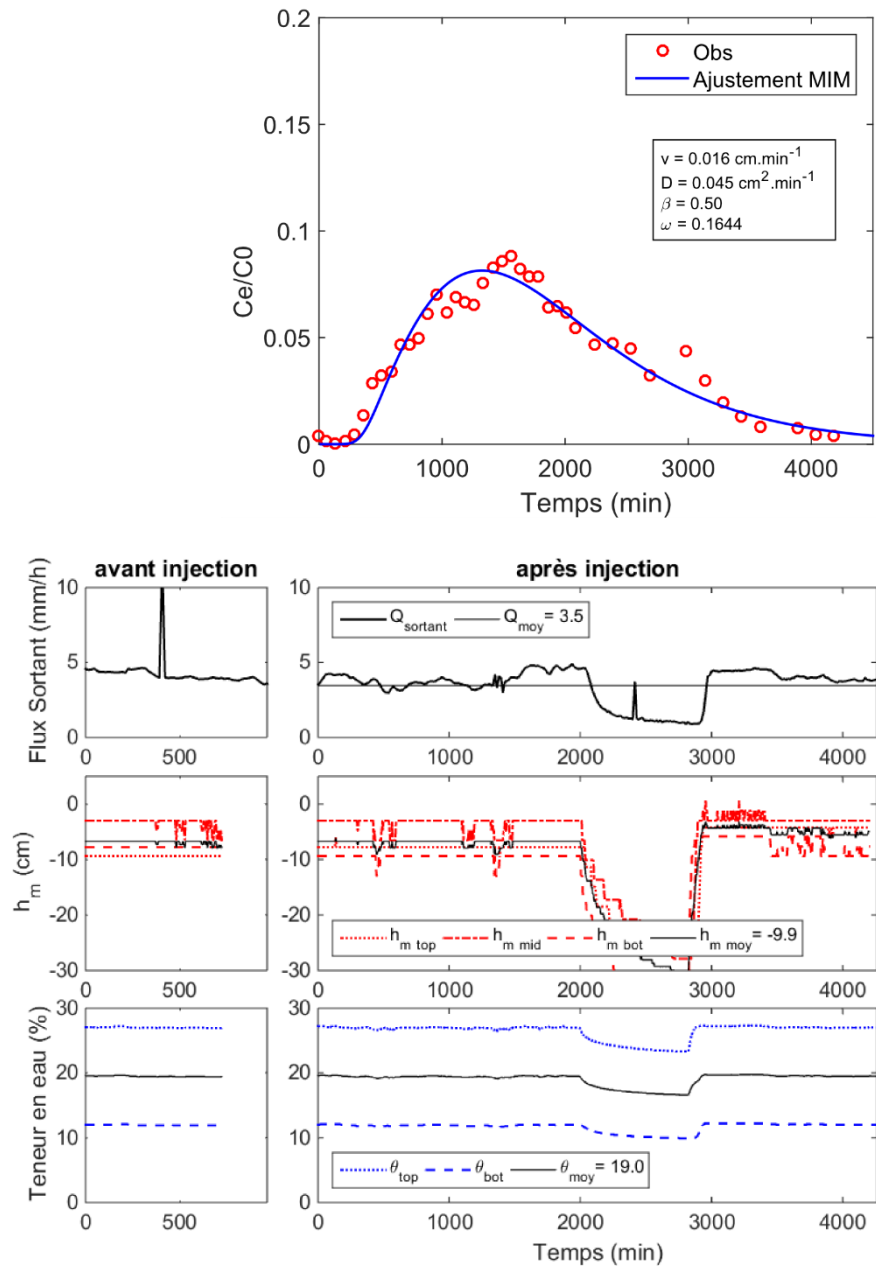


Figure 39: Courbe de percée ajustée à l'équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°2 sur la colonne 8 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col8PER2).

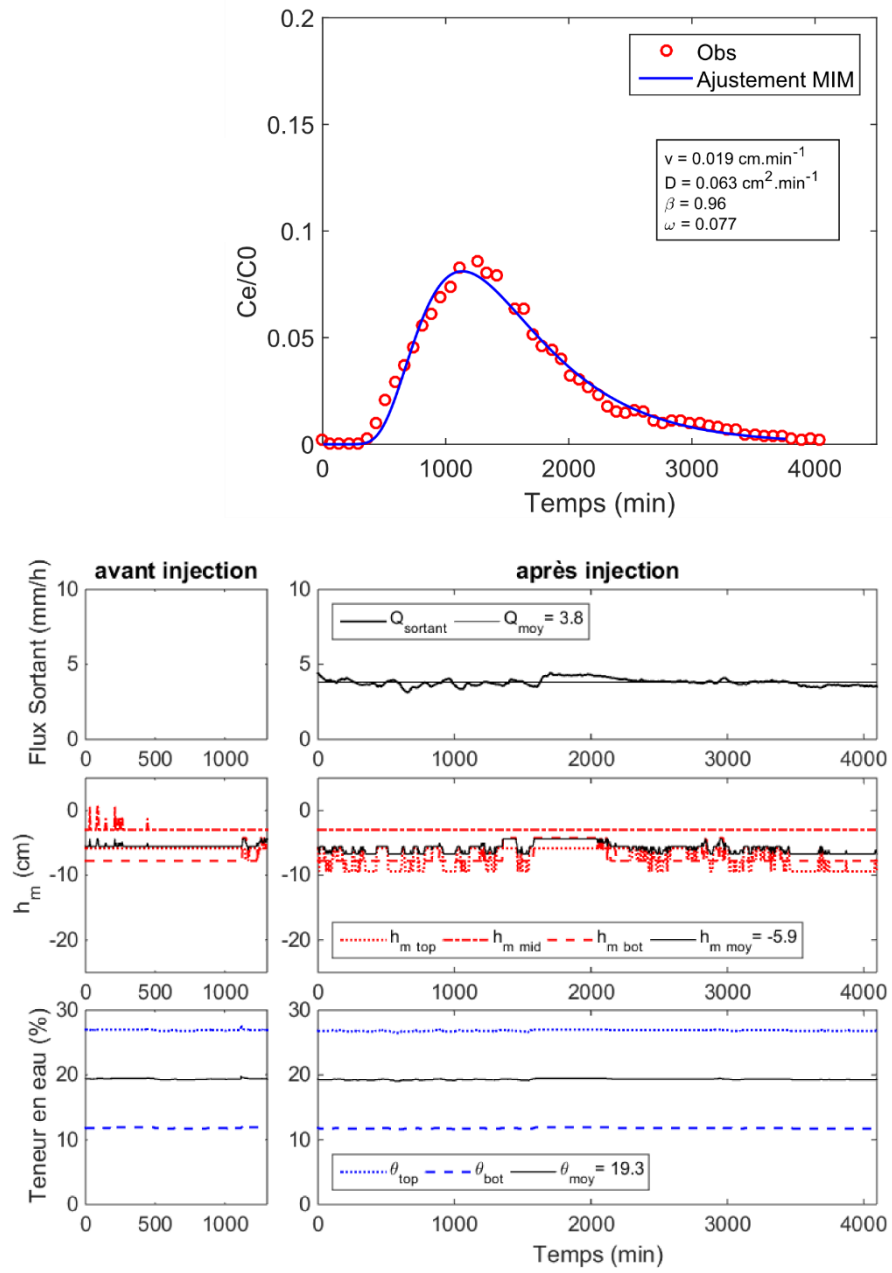


Figure 40: Courbe de percée ajustée à l'équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°3 sur la colonne 8 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col8PER3).

3.1.1.2.2 Intensité moyenne (8 mm/h) : « Temps de chien »

Tableau 9: Résumé des grandeurs suivies durant les expériences d'élution de la colonne 8 pour une intensité moyenne de précipitation (8 mm/h).

N° essai	V _m	Temps d'élution	Densité de flux	Taux.Rest	h _m moy	θ moy	θ estimé*
	(cm)	(min)	(mm/h)	(%)	(cm)	(%)	(%)
4	6,56	461	8,6	85	-3,2	20,2	21,9
5	8,05	573	8,4	96	-3,3	20,2	26,8
6	8,01	573	8,3	90	-2,9	20,2	26,7

*θ estimé : V_m/L, en supposant un écoulement convectif dispersif pur

Concernant les courbes de percées à 8 mm/h de la colonne 8, elles ont des tracés proches (Annexe 14 à 16) et se caractérisent par une forte asymétrie. Le Tableau 9 résume les résultats de ces expériences. Le temps d'élution de l'essai n°4 est plus court que pour les autres essais. La teneur en eau mesurée est stable pour les trois expériences. Le potentiel matriciel est proche de la saturation avec des valeurs moyennes proche de 0. La différence entre la teneur en eau estimée et la teneur en eau mesurée tend à montrer que l'écoulement n'est pas de type convectif dispersif pur. Pour tous les essais, le modèle de transport MIM simule les observations avec un R² de plus de 0,96.

3.1.1.2.3 Forte intensité (16 mm/h) : « Temps à tomber des cordes »

Tableau 10: Résumé des grandeurs suivies durant les expériences d'élution de la colonne 8 pour une forte intensité de précipitation (16 mm/h).

N° essai	V _m	Temps d'élution	Densité de flux	Taux.Rest	h _m moy	θ moy	θ estimé*
	(cm)		(mm/h)	(%)	(cm)	(%)	(%)
7	7,42	268	15,5	74	-0,4	20,5	24,7
8	6,42	249	15,5	65	-0,5	20,5	21,4
9	6,89	249	15,5	88	-0,5	20,6	23,00

*θ estimé : V_m/L, en supposant un écoulement convectif dispersif pur

Concernant les courbes de percées à 16 mm/h de la colonne 8, elles ont, là aussi, des tracés proches avec une forte asymétrie des courbes (Annexe 17 à 19). Le Tableau 10 résume les résultats de ces expériences. La teneur en eau

mesurée est stable sur trois expériences. Le potentiel matriciel est proche de la saturation avec des valeurs proches de 0. Le taux de restitution de l'essai 8 est médiocre, une erreur d'injection pourrait être à l'origine de cette faible restitution. La différence entre la teneur en eau estimée et la teneur en eau mesurée est importante et tend à montrer, là encore, que l'écoulement n'est pas de type convectif dispersif pur. Pour tous les ajustements, le modèle de transport MIM simule les observations avec un R^2 au-dessus de 0,95.

3.1.1.3 Colonne 3

Le Tableau 11 résume les paramètres obtenus pour les expériences en régime permanent à 4 mm/h de la colonne 3 (diamètre 10 cm). Les V_m sont très faibles et décroissent au fil des expériences. Les taux de restitution sont bons, sauf pour la dernière expérience qui a souffert d'une panne du collecteur de fraction durant la phase de restitution du pic de concentration. Pour la première expérience, le potentiel matriciel est négatif puis devient positif lors des deux expériences suivantes. Le suivi du potentiel matriciel montre que les valeurs positives du potentiel matriciel sont cohérentes entre les trois tensiomètres de la colonne. Les capteurs n'ont pas montré de signe extérieur de dysfonctionnement. Des valeurs de potentiels matriciels positives entre 30 et 50 cm, sans charge apparente visible dans la colonne, montrent que les capteurs ne fonctionnent plus. Enfin les valeurs de teneur en eau estimées à partir de la lame d'eau sortie indiquent que l'écoulement n'est pas type convectif dispersif pur.

Tableau 11: Résumé des grandeurs suivies durant les expériences d'élution de la colonne 3 pour une faible intensité de précipitation (4 mm/h).

N° essai	V_m	Temps d'élution	Densité de flux	Taux.Rest	h_m moy	θ moy	θ estimé*
	(cm)	(min)	(mm/h)	(%)	(cm)	(%)	(%)
1	8,15	427	2,0	92,0	-11,26	15,2	27,2
2	7,35	255	3,5	97,0	19,90	15,5	24,5
3	6,69	255	3,4	60,0	31,5	15,5	22,3

* θ estimé : V_m/L , en supposant un écoulement convectif dispersif pur

Pour la première et la seconde courbe de percée, l'ajustement STAMOD est bon avec respectivement un R^2 de 0,94 et 0,98 (Annexe 20 et 21). Pour la troisième courbe de percée, l'ajustement STANMOD est mauvais et ne permet pas de reproduire un tracé proche de la courbe expérimentale (Annexe 22). Le R^2 est de 0,02.

3.1.1.4 Comportement des traceurs

A l'occasion de trois expériences d'élution, deux traceurs (Br- et DFBA) ont été injectés simultanément à la surface (Figure 41). On observe que leur concentration évolue de la même façon dans les deux colonnes. Leurs propriétés vis-à-vis du matériau sont équivalentes. Les deux traceurs sont donc interchangeables lors des expériences d'élution.

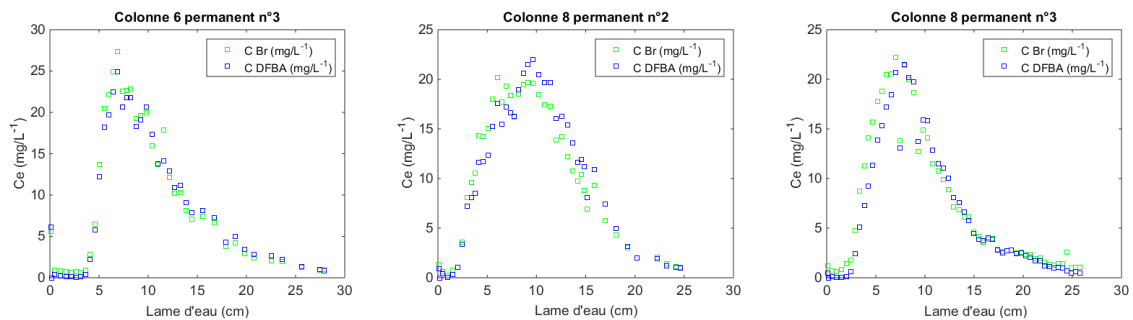


Figure 41: Comportement des traceurs DFBA et bromure lors de trois expériences en régime permanent

3.1.1.5 Hétérogénéité des perméabilités

3.1.1.5.1 Suivi instrumental

Le suivi instrumental montre une différence de comportement entre les deux colonnes du point de vue de la teneur en eau et de l'état de l'eau dans les deux faciès.

3.1.1.5.1.1 Colonne 6

Dans la colonne '6', correspondant au faciès homogène, à la plus faible intensité, l'écoulement est purement gravitaire (le profil de potentiel total est parallèles à la droite du potentiel gravitaire) (Figure 42(A)). Lorsque l'intensité de pluie augmente, le potentiel à la base du calcaire augmente,

jusqu'à atteindre la saturation à l'intensité la plus grande (16 mm/h) (Figure 42(B)) (COL6PER8 et COL6PER9).

Ce comportement se retrouve dans le comportement des sondes de teneur en eau : plus l'intensité de précipitation est importante, plus les valeurs de teneur en eau sont importantes. Les teneurs en eau sont plus importantes à la base de la colonne (Figure 35 à 37 et Annexes 8 à 13).

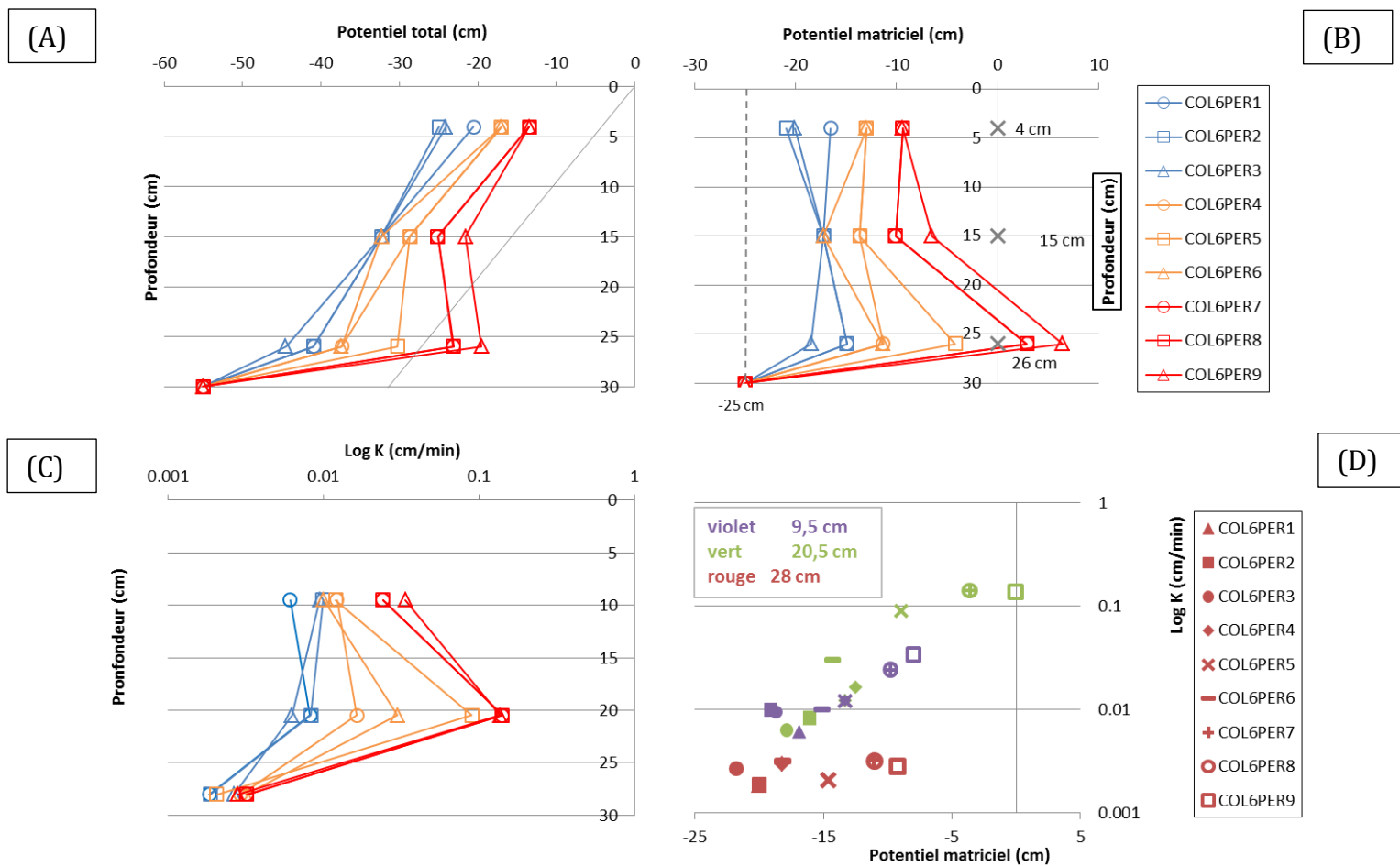


Figure 42 : Profil de potentiel et conductivité hydraulique dans la colonne 6 pour l'ensemble des expériences en régime permanent

3.1.1.5.1.2 Colonne 8

Dans la colonne '8', ou faciès hétérogène, les valeurs tensiométriques varient très peu d'une expérience à l'autre pour une même intensité de précipitation. Le potentiel total moyen des trois tensiomètres se décale vers la droite avec l'intensité de précipitation, et se rapproche de la droite du potentiel gravitaire (Figure 43(A)). Les valeurs sont rapidement proches de la saturation (0 cm) avec l'augmentation de l'intensité de précipitation (Figure 43(B)). Le tensiomètre 'mid' décrit un potentiel matriciel positif au-delà de l'intensité de précipitation de 8 mm/h. Le gradient de pression décrit par les trois tensiomètres s'inverse à l'intérieur de la colonne et montre que celle-ci est hétérogène.

De même, les valeurs de teneur en eau ne varient quasiment pas avec l'intensité de précipitation, et le gradient est 'inversé', la teneur en eau est plus importante en sommet de colonne qu'à sa base (Figure 38 à 40 et Annexes 14 à 19). Le manque de réponse des valeurs de teneur en eau donnée par la sonde 'bot' à la suite d'une perturbation du flux (interruption de flux liée à une panne, COL8PER2 et COL8PER3) tend à montrer soit une mauvaise continuité entre la sonde et le milieu, soit une forte hétérogénéité du milieu.

Au sein de cette colonne, deux appareils de mesure (sonde de teneur en eau 'bot' et tensiomètre 'mid') montrent des valeurs 'anomaliques' dans la même zone de la colonne, entre 15 et 20 cm de profondeur. Ce qui tend à montrer que ces valeurs 'anomaliques' sont le résultat de l'hétérogénéité de la colonne.

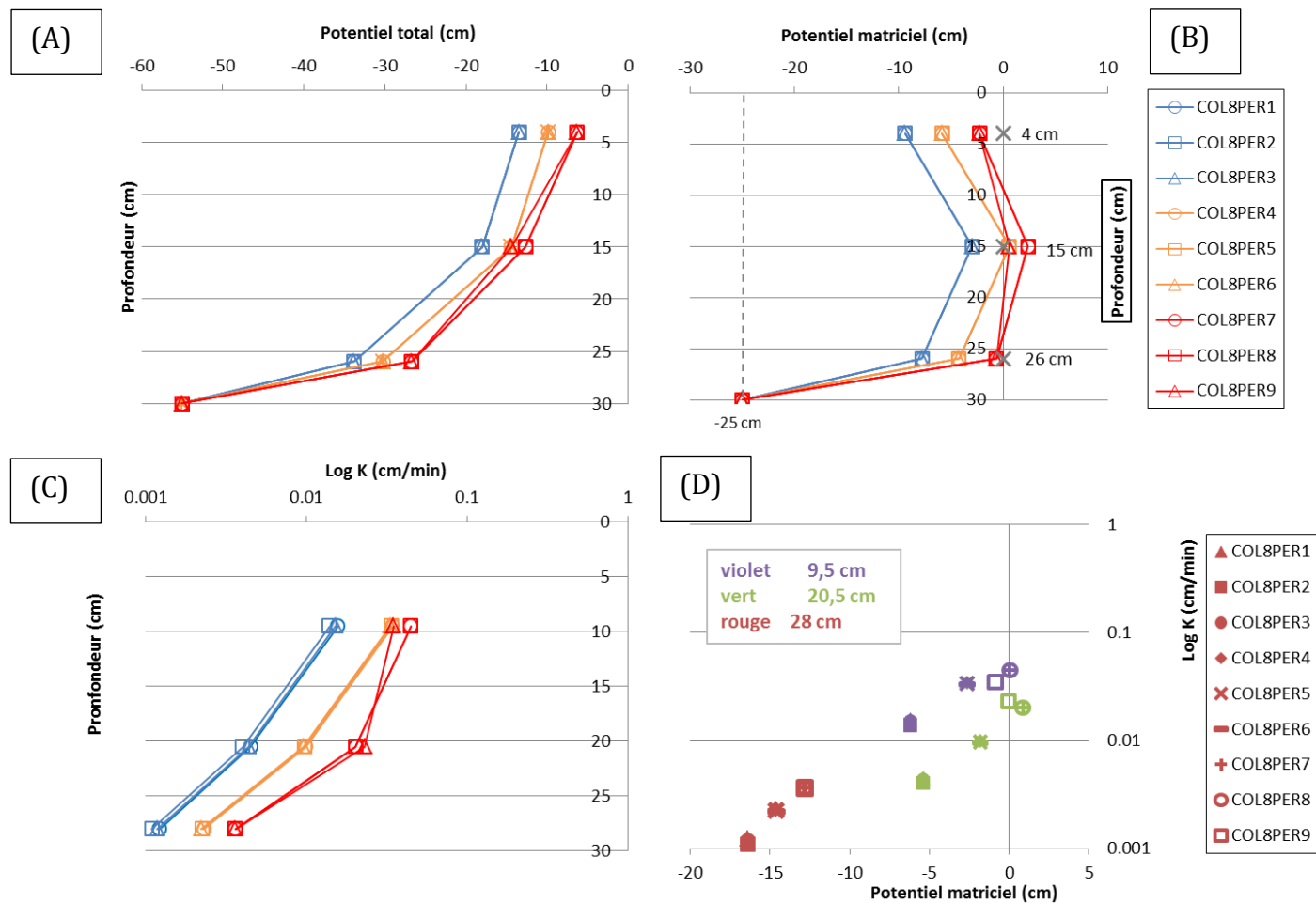


Figure 43: Profil de potentiel et conductivité hydraulique dans la colonne 8 pour l'ensemble des expériences en régime permanent

3.1.1.5.1.3 Colonne 3

Pour la colonne 3 (dia 10 cm), les valeurs de teneur en eau et potentiel matriciel sont cohérentes pour la première expérience. Le potentiel matriciel devient complètement incohérent pour les expériences 2 et 3 avec des potentiels largement positifs (entre 30 et 50 cm). La canne tensiométrique a été vérifiée pour expliquer ces valeurs, les capteurs ne présentaient aucune bulle dans la canne souple, et aucun dysfonctionnement apparent.

Le suivi instrumental de la première expérience (COL3PER1) est viable. Le suivi de la teneur en eau montre que le gradient de teneur en eau au sein de la colonne est faible et inversé. Les valeurs de 'top' sont plus importantes que les valeurs de 'bot' ($\theta_{\text{top moy}} = 0,155 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ et $\theta_{\text{bot moy}} = 0,149 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$), ce qui pourrait indiquer une hétérogénéité au sein de la colonne (Annexe 20).

3.1.1.5.2 Profil de conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique à l'intérieur de la colonne peut-être estimée en régime permanent en utilisant le gradient de pression décrit par les tensiomètres et la loi de Darcy.

3.1.1.5.2.1 Profil de conductivité hydraulique dans la colonne 6

La Figure 42(C), montre la conductivité hydraulique estimée entre deux points de mesure du potentiel matriciel. Pour les faibles intensités de précipitation (4 mm/h), la conductivité hydraulique est homogène sur toute la hauteur de la colonne, avec une légère baisse de la conductivité à 28 cm de profondeur. Lorsque l'intensité de précipitation augmente (8 mm/h), la conductivité augmente en profondeur à 20,5 cm de profondeur puis chute brutalement à 28 cm de profondeur. A l'intensité de précipitation de 16 mm/h, on observe une augmentation encore plus importante de la conductivité à 20,5 cm de profondeur. Cette évolution s'accompagne d'une saturation de la base de la colonne (Figure 42(B)). Il y a un phénomène d'impédance à la base de la colonne.

La Figure 42(D) montre la conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel pour chaque expérience d'élution et pour chaque profondeur. La conductivité hydraulique à la profondeur de 28 cm ne varie quasiment pas avec le potentiel matriciel, ce qui n'est pas le cas des autres profondeurs qui montrent des variations en fonction du potentiel matriciel, notamment la profondeur 20,5 cm. Il semble donc que la base de la colonne ait atteint sa conductivité maximale à saturation.

3.1.1.5.2.2 Profil de conductivité hydraulique dans la colonne 8

La Figure 43(C) montre la conductivité hydraulique estimée entre deux points de mesure du potentiel matriciel. A contrario dans la colonne 6, dans cette colonne la conductivité hydraulique est plus importante au sommet de la colonne, et diminue jusqu'à la profondeur de 28 cm. Ce gradient s'accroît avec l'augmentation de la précipitation. Cette dynamique de la conductivité montre qu'il y a au sein de la colonne un niveau moins perméable sur toute la seconde partie de la colonne (15 à 30 cm).

La Figure 43(D) montre la conductivité hydraulique en fonction du potentiel matriciel pour chaque expérience d'élution et chaque profondeur. Les points $K(h_m)$ de la profondeur 9,5 cm et 28 cm semblent s'aligner sur une courbe, alors que les points $K(h_m)$ de la profondeur de 20,5 cm ne s'alignent pas et présentent un décalage flagrant des valeurs vers la droite. La relation $K(h_m)$ peut être décrite par une courbe qui est moins incurvée que pour la colonne 6. Les valeurs à la profondeur de 20,5 cm sont en partie dues au tensiomètre 'mid' et peuvent être le résultat d'un niveau particulièrement hétérogène par rapport au reste de la colonne. Il semble que la conductivité à la base de la colonne soit limitante, comme observé pour la colonne 6. Le phénomène pourrait s'expliquer par l'impédance hydraulique du dispositif à la base de la colonne.

3.1.2 Discussion

3.1.2.1 Reproductibilité des courbes de percée

Pour la colonne 6 à faible intensité de précipitation (4 mm/h), la reproductibilité des résultats est mauvaise (Figure 44). L'intensité du pic de concentration et le volume poral V_m (Tableau 5) sont différents pour l'essai 3. En revanche la réplicabilité est meilleure pour les intensités plus importantes (8 mm/h et 16 mm/h). Les intensités des pic de concentration sont plus proches et les valeurs de V_m sont globalement identiques (Tableau 6 et Tableau 7). Le temps d'arrivée du pic est commun pour les essais à 8 et 16 mm/h.

Pour la colonne 8 à faible intensité de précipitation (4 mm/h), la reproductibilité des résultats est, là aussi, mauvaise : l'intensité du pic de concentration, V_m et le temps d'arrivée du pic de concentration sont très variables. La reproductibilité des courbes est meilleure pour les intensités de précipitation plus importantes (8 mm/h et 16 mm/h). L'intensité du pic de concentration est cependant variable et les valeurs de V_m sont également plus proches qu'à faible intensité de précipitation.

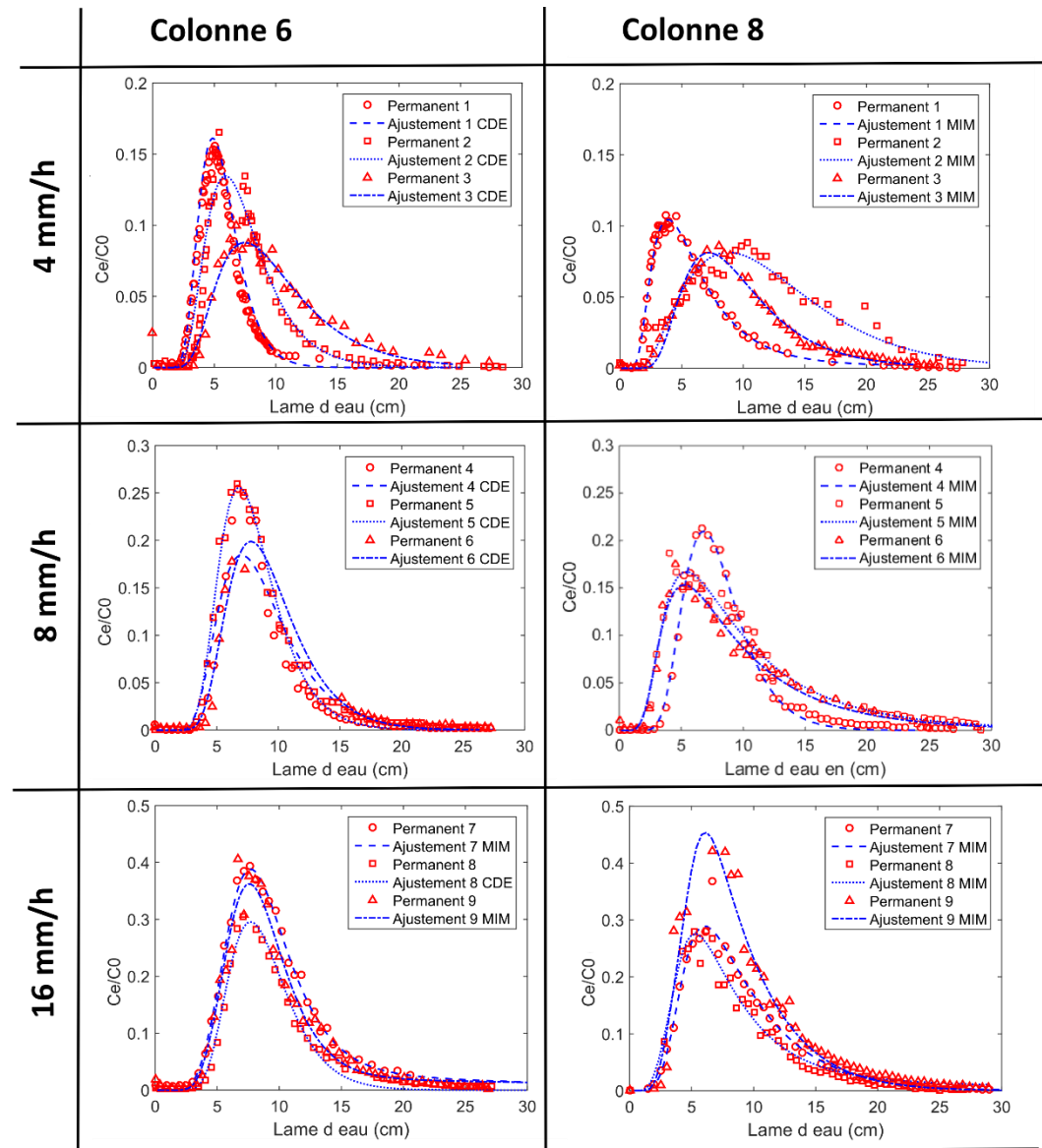


Figure 44 : Courbes de percées et ajustement pour l'ensemble des essais.

Pour la colonne 3, les courbes de percées sont très variables, à cause notamment d'un dysfonctionnement du collecteur de fraction pour l'essai 3 (Figure 45). L'intensité du pic de concentration est variable, les valeurs de V_m sont relativement proches.

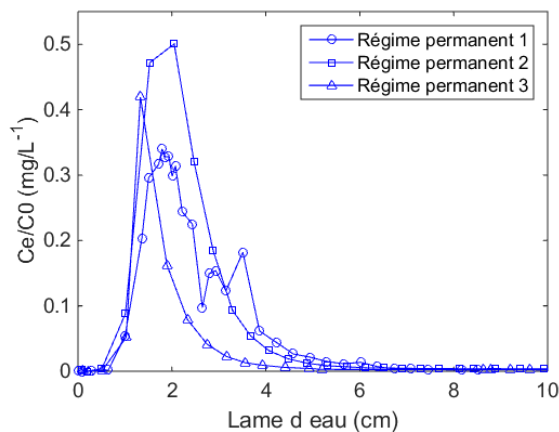


Figure 45: Courbes de percées de la colonne 3 pour la faible intensité de précipitation (4 mm/h).

3.1.2.2 Interprétation des écoulements

Les courbes de percées obtenues en régime permanent (Figure 44) montrent que le comportement entre les deux colonnes est différent. Les courbes de percée de la colonne 8 montrent des pics plus asymétriques avec une arrivée précoce du soluté et une queue d'éluion plus étalée dans le temps, que celles obtenues pour la colonne 6. L'augmentation de l'intensité de la précipitation ne semble pas modifier notablement la forme des courbes de percée. La réplicabilité des courbes est meilleure pour les intensités de précipitations 8 et 16 mm/h.

Les ajustements effectués à l'aide de STANMOD montrent que les deux colonnes ont des comportements différents. La forme des courbes de percées de la colonne 6 peut s'expliquer avec l'équation CDE pour les intensités de pluie de 4 mm/h et 8 mm/h, alors que la forme des courbes de percée de la colonne 8 à ces mêmes intensités de pluie ne peut s'expliquer qu'avec un modèle MIM. Pour la colonne 6, à forte intensité de précipitation (16 mm/h), l'ajustement MIM devient nécessaire sur deux des trois réplicats pour mieux expliquer la forme de la courbe. L'augmentation de l'intensité de pluie engendre la mobilisation de macropores disponibles pour l'écoulement (Pot et al., 2005).

3.1.2.3 Estimation des paramètres de transport

La dispersion hydrodynamique est elle aussi différente entre les deux colonnes. En moyenne, la dispersion est de 2 cm pour la colonne 6 et de 4,6 cm pour la colonne 8 (Tableau 12 et Tableau 13). Une valeur plus importante de la dispersivité est cohérente avec le caractère hétérogène de la colonne 8. L'eau immobile dans la colonne 8 varie entre 5 et 50 % du contenu en eau dans la colonne, avec une moyenne sur l'ensemble des essais de 38 %. Les vitesses de la colonne 8 sont légèrement plus faibles que les valeurs de vitesse estimées pour la colonne 6. Les termes d'échanges (α) sont très faibles, si bien que l'eau immobile pourrait être considérée comme participant peu à l'échange avec l'eau mobile dans le cas d'un régime permanent.

Tableau 12: Estimation des paramètres hydrodynamiques pour la colonne 6

N° Permanent	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Type d'ajustement*	CDE	CDE	CDE	CDE	CDE	CDE	MIM	CDE	MIM
v (cm/min)	0.036	0.03	0.020	0.053	0.053	0.049	0.055	0.103	0.041
D (cm²/min)	0.062	0.044	0.064	0.065	0.103	0.100	0.102	0.176	0.091
λ (cm)	1.74	1.48	3.13	1.22	1.95	2.05	1.85	1.7	2.22
R²	0.969	0.961	0.952	0.987	0.988	0.959	0.97	0.983	0.97
β							0.51		0.4
ω							0.015		0.011
α (min⁻¹)							8.2E-06		4.9E-06

*CDE : Equation de convection-dispersion, *MIM : Modèle eau mobile- eau immobile

Tableau 13: Estimation des paramètres hydrodynamiques pour la colonne 8

N° Permanent	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Type d'ajustement *	MIM	MIM	MIM	MIM	MIM	MIM	MIM	MIM	MIM
v (cm/min)	0.015	0.016	0.019	0.05	0.035	0.039	0.104	0.050	0.121
D (cm ² /min)	0.081	0.045	0.063	0.271	0.294	0.122	0.413	0.137	0.349
λ (cm)	5.74	2.77	3.28	5.43	8.41	3.08	3.94	2.69	2.88
R ²	0.984	0.931	0.981	0.991	0.966	0.976	0.977	0.973	0.905
β	0.49	0.5	0.96	0.84	0.81	0.52	0.84	0.50	0.75
ω	0.00517	0.1644	0.0777	0.0557	0.1.10-5	0.0433	0.01886	0.00854	0.02947
α (min ⁻¹)	4.84E-06	1.76E-05	9.60E-06	1.87E-05	2.35E-10	1.15E-05	1.35E-05	2.97E-06	3.97E-05

*CDE : Equation de convection-dispersion, *MIM : Modèle eau mobile- eau immobile

3.1.2.4 Impact du diamètre de la colonne

Les expériences sur la colonne 3 ont montré que les résultats ne sont pas répliquables, au même titre que les colonnes 6 et 8 pour les faibles intensités de pluie. Mais les valeurs des capteurs du potentiel matriciel ne sont pas satisfaisantes (Tableau 11).

3.1.3 Synthèse

Notre étude a permis d'obtenir des valeurs des paramètres de transport (λ , β , α) pour la ZNS du Calcaire de Beauce. Celle-ci est très hétérogène à l'échelle de quelques dizaines de centimètres. Deux colonnes de diamètre 20 cm ont été échantillonnées dans deux faciès différents, une colonne contenant un matériau « homogène » fin et une colonne contenant un matériau très « hétérogène » grossier. Une colonne de diamètre 10 cm a été échantillonnée dans un faciès « homogène » du même calcaire.

La forme des courbes de percées obtenues en régime permanent pour les colonnes de diamètre 20 cm montre des comportements différents du point de vue de l'écoulement. L'écoulement est différent en fonction du faciès contenu dans la colonne. Le comportement de la colonne au faciès homogène peut s'expliquer avec une équation classique convection-dispersion (CDE), alors que le comportement de la colonne au faciès hétérogène s'explique avec

un modèle de type eau mobile- eau immobile (MIM). De plus, ces expériences montrent que l'augmentation de l'intensité des précipitations permet l'activation d'un fonctionnement de type eau mobile-eau immobile au sein de la colonne la plus homogène.

Pour la colonne de diamètre 10 cm de faciès homogène, les courbes de percée peuvent être ajustées avec une CDE, ce qui est cohérent avec les observations obtenues pour les colonnes de diamètre supérieur (20 cm).

Le comportement à l'écoulement est donc fonction du faciès local de la ZNS (homogène/hétérogène). L'intensité de l'écoulement peut aussi modifier le comportement d'un faciès vis-à-vis du transport des solutés. La variabilité de faciès de la ZNS, autant horizontalement que verticalement, devrait donc être prise en compte pour la prédiction des risques de contamination des eaux souterraines à l'échelle du grand ensemble hydrologique constitué par l'aquifère de Beauce.

3.2 Résultats des expériences d'élution sur colonnes en régime transitoire

Afin d'étudier le transport de type MIM dans les matériaux étudiés, des expériences d'élution avec des interruptions de flux ont été réalisées.

3.2.1 Interruption de flux sans drainage de la colonne

3.2.1.1 Colonne 6

3.2.1.1.1 Scénario 1 : Interruption de flux « par temps de crachin »

La courbe de percée pour l'interruption de flux à 4 mm/h (Figure 46) ne montre pas de déformation. La concentration relative est proche de la concentration relative atteinte pour les régimes permanents pour la même intensité de précipitation.

3.2.1.1.2 Scénario 2 : Interruption de flux « par temps de chien »

La courbe de percée pour l'interruption de flux à 8 mm/h (Figure 47) montre une légère déformation liée à l'interruption de flux : la concentration relative maximale est proche de la concentration relative atteinte pour les régimes permanents étudiés à la même intensité de précipitation. La concentration relative à la reprise du flux (point noir) est largement au-dessus de la concentration relative avant l'interruption de flux. Après la reprise, la concentration relative baisse puis croît de nouveau. Hormis ces perturbations localisées à la reprise du flux, la courbe n'est pas déformée et équivalente.

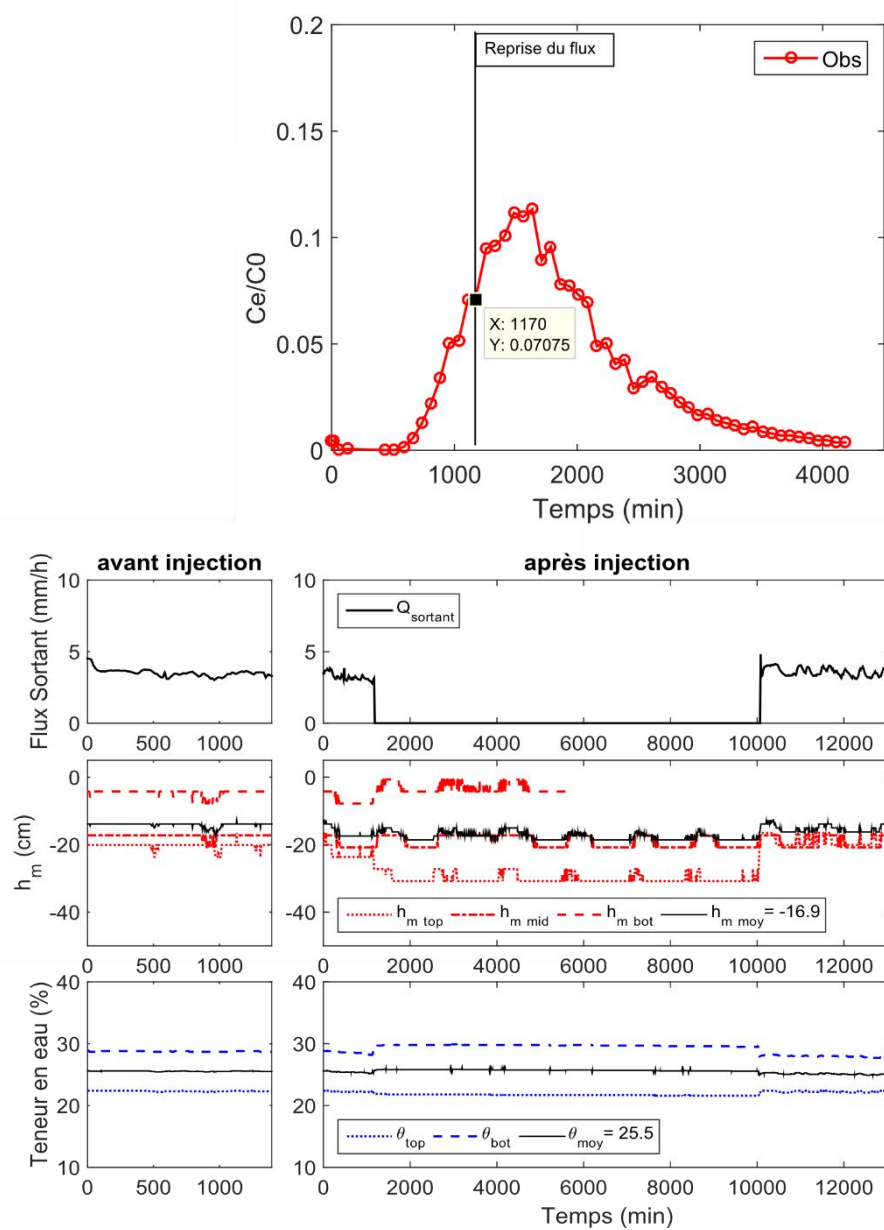


Figure 46: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution avec interruption de flux n°1 de colonne 6 à intensité de précipitation moyenne (4 mm/h) (Col6Int4mmH).

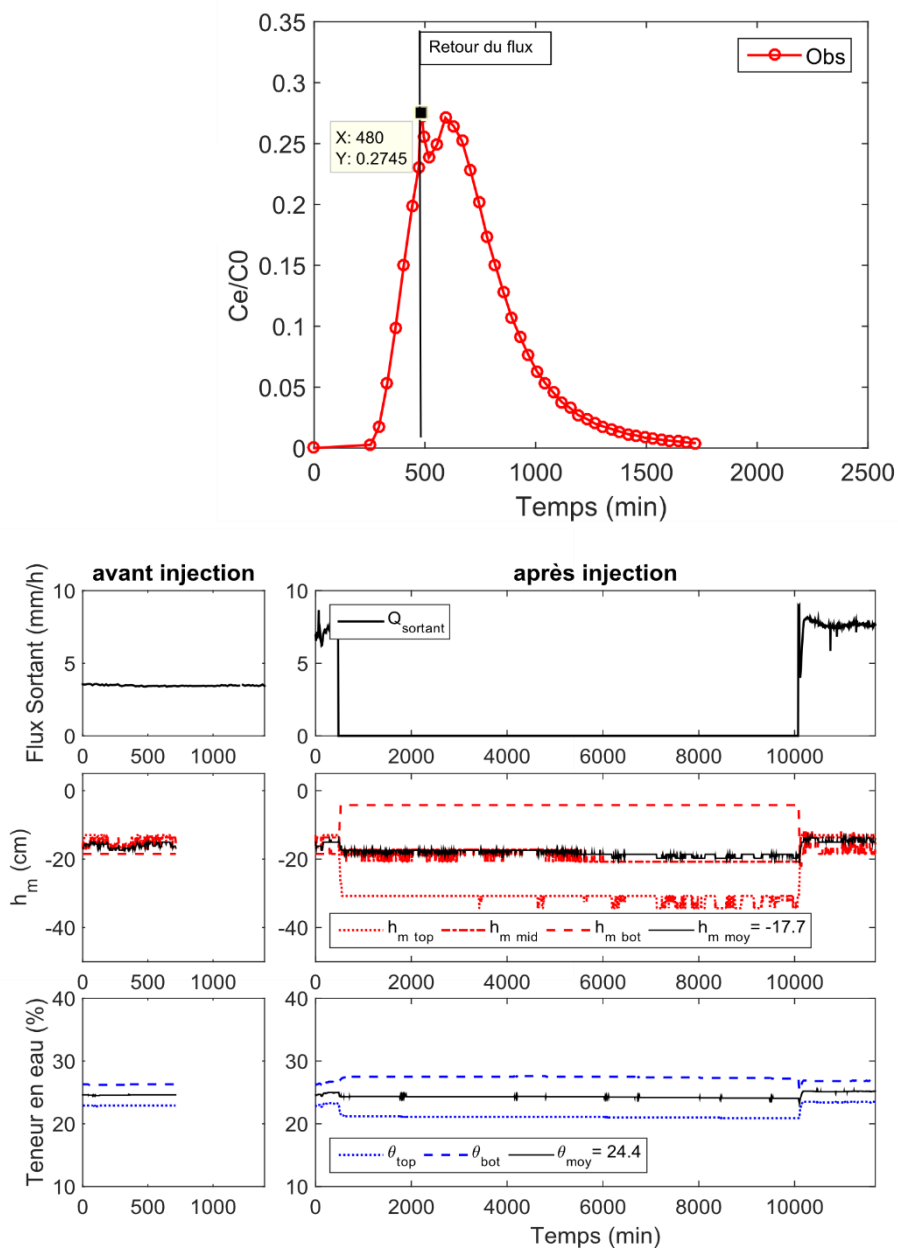


Figure 47: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution avec interruption de flux n°2 de colonne 6 à intensité de précipitation moyenne (8 mm/h) (Col6Int8mmH).

3.2.1.2 Colonne 8

3.2.1.2.1 Scénario 1 : Interruption de flux « par temps de crachin »

La courbe de percée de la colonne 8 pour l'intensité de précipitation à 4 mm/h décrit une courbe très atypique, avec une courbe ascendante très tardive (Figure 48). La concentration relative maximale est proche de la

concentration observée pour les régimes permanents de même intensité de précipitation. L'interruption de flux à 1170 min ne semble pas déformer la forme de la courbe.

3.2.1.2.2 Scénario 2 : Interruption de flux « par temps de chien »

La courbe de percée de la colonne 8 pour l'intensité de précipitation à 8 mm/h est atypique (Figure 49). La concentration relative maximale est proche de la concentration pour les régimes permanents de même intensité de précipitation. L'interruption de flux déforme fortement la courbe. A la reprise du flux, la concentration relative décrit un écart important avec la concentration relative avant l'interruption du flux.

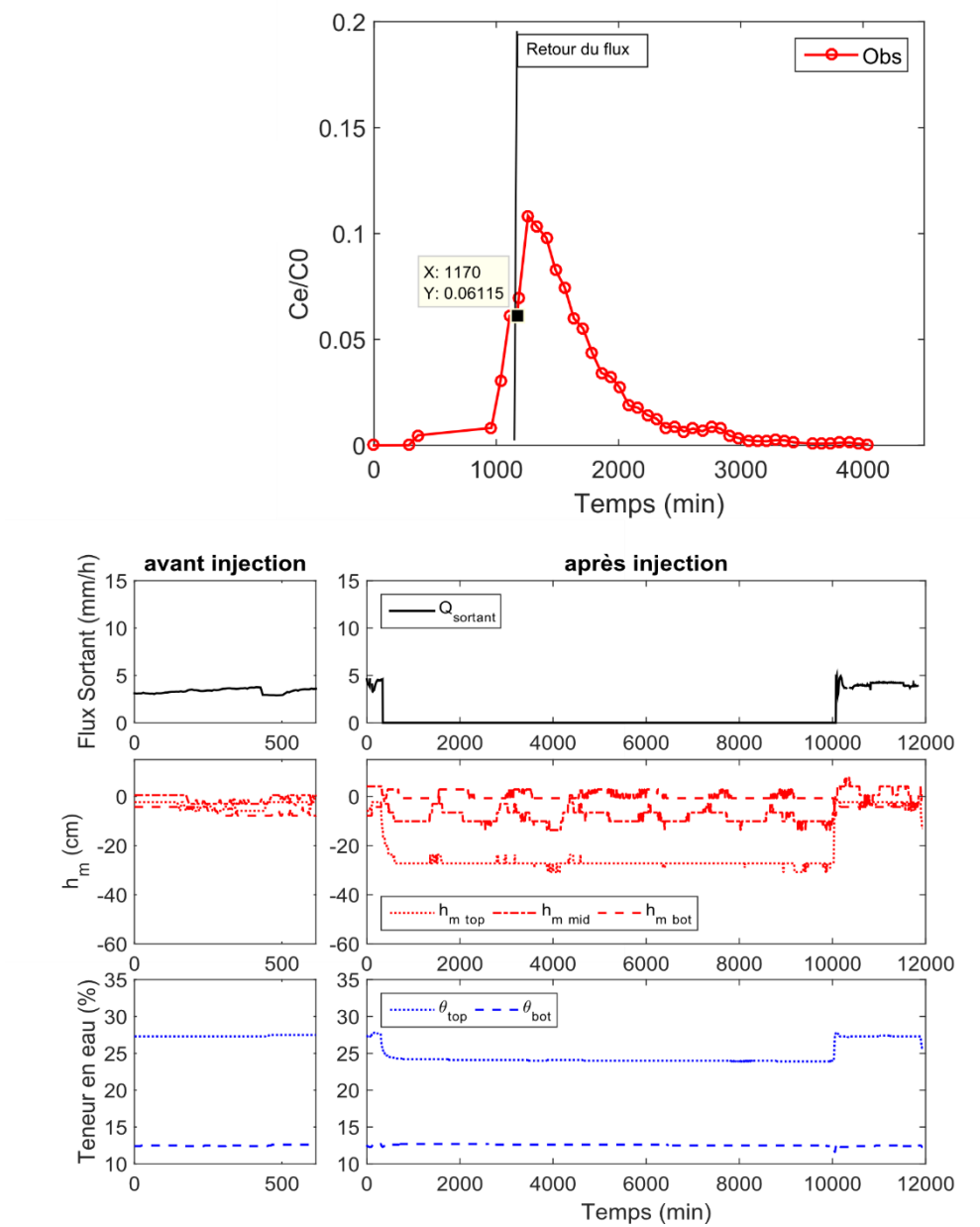


Figure 48: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°1 de colonne 8 à intensité de précipitation moyenne (4 mm/h) en régime transitoire d'interruption de flux (Col8Int4mmH).

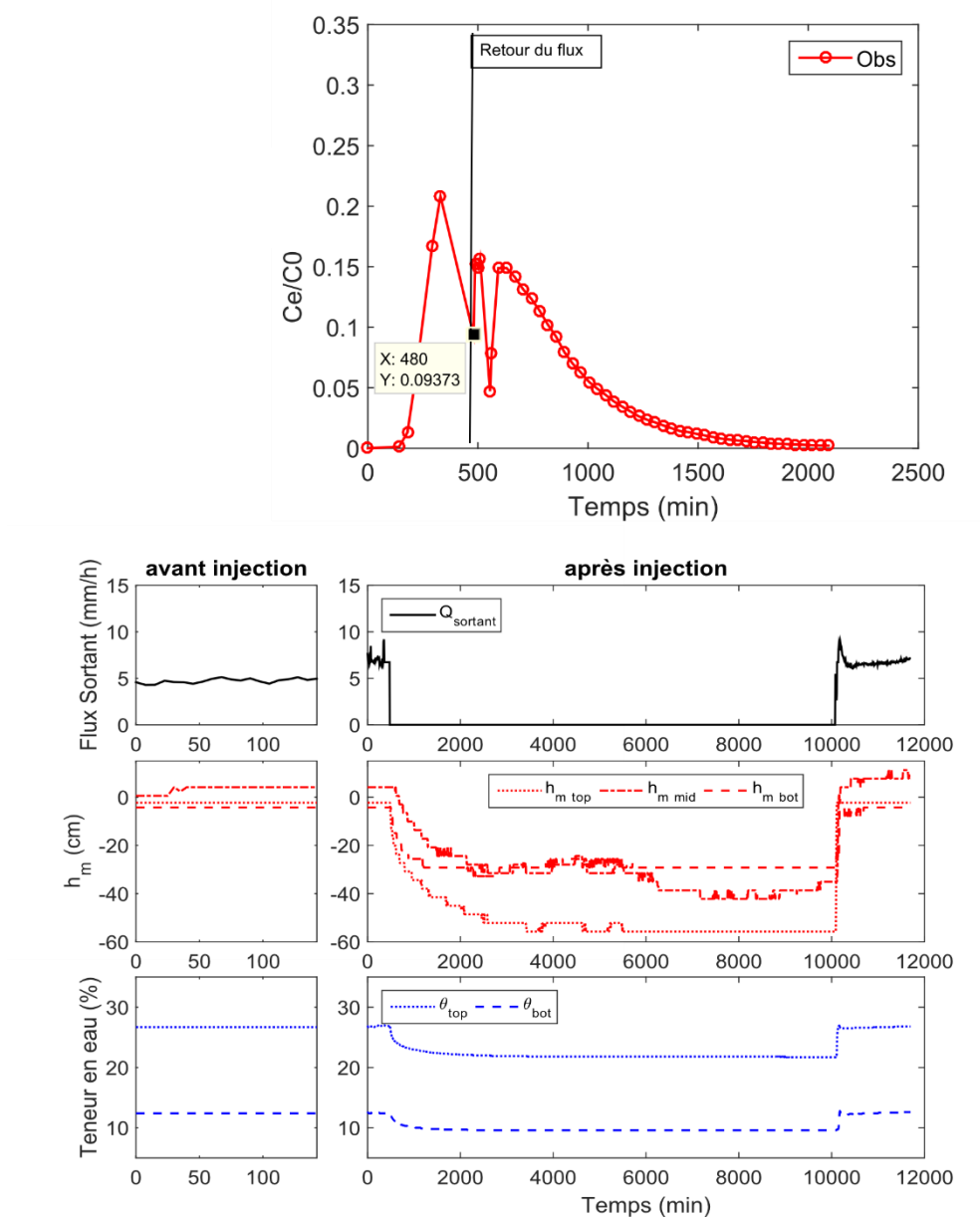


Figure 49: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°1 de colonne 8 à intensité de précipitation moyenne (8 mm/h) en régime transitoire d'interruption de flux (Col8Int8mmH).

3.2.1.3 Suivi instrumental

Le suivi instrumental des expériences en régime transitoire d'interruption de flux montrent deux milieux avec des inerties différentes.

Pour la colonne 6, durant les phases d'interruption à l'intensité de précipitation 8 mm/h, nous observons un écart immédiat à la moyenne de la part des tensiomètres 'top' et 'bot' (Figure 47). Les valeurs du tensiomètre 'mid' varient très légèrement et restent proche de la moyenne. Cet écart immédiat se traduit également par des valeurs de teneur en eau qui augmentent en bas de la colonne ('bot') et qui diminuent en haut de la colonne ('top'). Pour l'intensité de précipitation 4 mm/h, les tensiomètres varient très peu juste après l'interruption de flux (Figure 46).

L'essai d'interruption de flux à 8 mm/h pour la colonne 8 (Col8Int8mmH) présente des courbes de suivi tensiométrique et de teneur en eaux différentes des autres essais. La décroissance progressive des valeurs tensiométriques tend à montrer une interruption de type drainage (Figure 49). Une fuite observée au niveau du robinet à la base de la colonne pourrait expliquer l'allure de ces courbes.

Pour la colonne 8, durant les phases d'interruption, aux deux intensités de précipitation, on observe un écart progressif avec un décrochement moins abrupt des valeurs de potentiel matriciel et de teneur en eau que dans la colonne 6 (Figure 48). Malgré une réponse de la teneur en eau face à l'interruption de flux, le gradient de la teneur en eau dans la colonne 8 présente encore une inversion du gradient qui peut être interprétée comme une mauvaise continuité hydraulique entre les sondes et le milieu ou bien être due à l'hétérogénéité de la colonne (§3.1).

La Figure 50 montre le suivi du potentiel total dans les colonnes 6 et 8 durant la phase d'interruption de flux. Le $T_{0\ min}$ étant le temps au moment où se fait l'interruption de flux, et toutes les autres dates étant des temps relatifs à cette date. Dans la colonne 6, le potentiel total devient vertical assez rapidement après l'interruption (51 min à 8 mm/h). Les valeurs du potentiel provenant du tensiomètre ('mid') pour les deux essais restent proches de la moyenne, c'est donc que le gradient du potentiel total se rééquilibre (devient vertical) aussi vite dans la partie haute de la colonne que dans la partie basse.

Pour la colonne 8, le potentiel total se rééquilibre pour l'essai à l'intensité de précipitation 4 mm/h , mais beaucoup plus lentement que pour la colonne 6. Cette dynamique semble confirmer l'hypothèse d'un placement du tensiomètre 'mid' dans une zone particulière de la colonne, de plus faible conductivité que le reste de la colonne. Pour l'intensité de précipitation 8 mm/h, la rééquilibration du potentiel total se fait à un potentiel plus faible que pour les autres expériences. Cette analyse du potentiel montre bien qu'il y a eu une phase de drainage involontaire sur cette expérience.

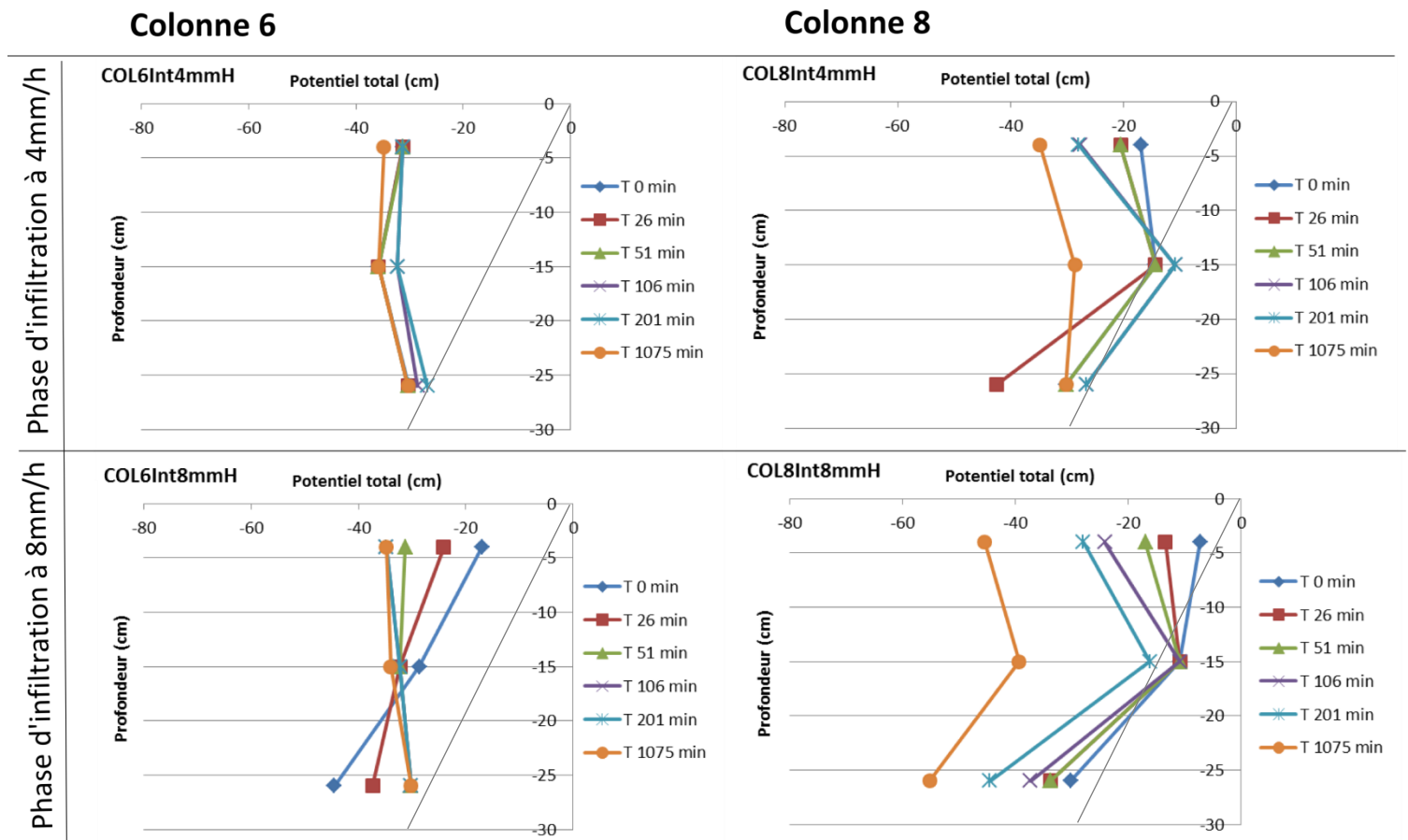


Figure 50: Suivi du potentiel total sur les phases d'interruption de flux sur la colonne 6 et 8 pour 4 et 8 mm/h

3.2.1.1 Discussion

3.2.1.1.1 Déformation de la courbe de percée

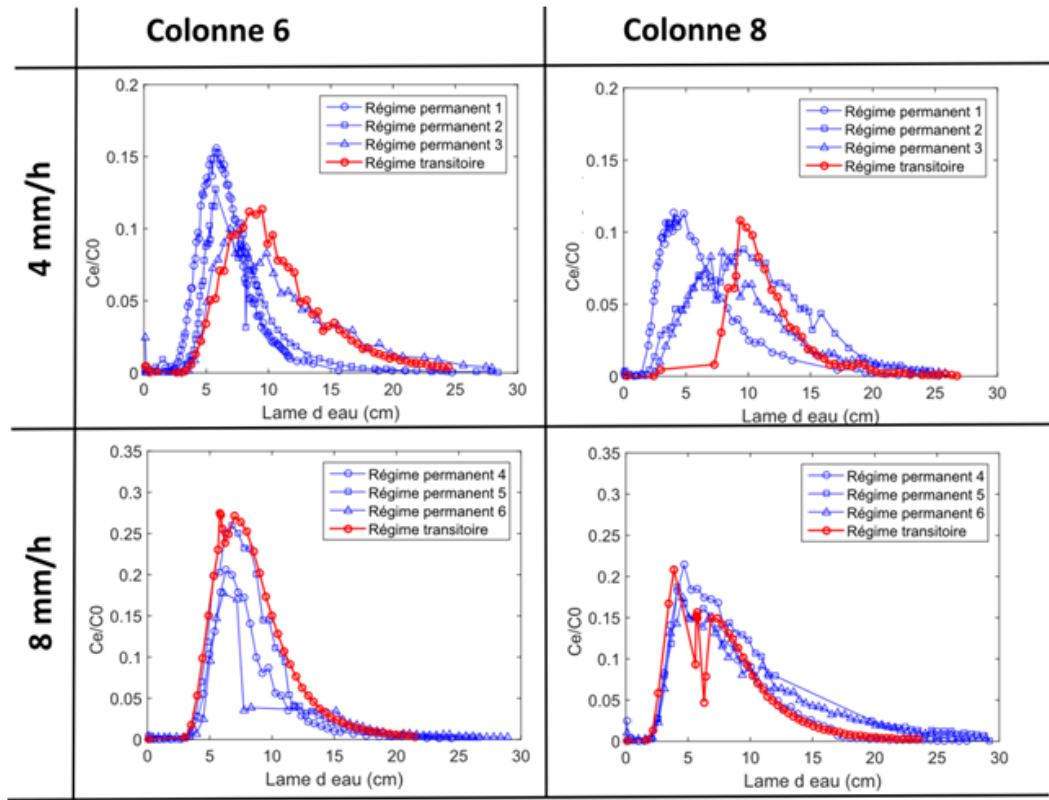


Figure 51 : Courbes de percée en régime permanent et en régime transitoire pour la colonne 6 et la colonne 8

Pour les faibles intensités de précipitation, la courbe en régime transitoire est différente des courbes en régime permanent excepté pour la COL6PER3. C'est la mauvaise reproductibilité de courbe à faible intensité qui peut engendrer l'écart observé entre l'essai en régime transitoire et les deux premiers essais en régime permanent. La déformation due à l'interruption du flux est minime. L'interruption de flux ne semble pas avoir d'impact sur la forme de la queue d'élution. Lors des interruptions de flux involontaires durant la réalisation des essais en régime permanent (exemple Col8PER2 vers 3000 min (Figure 39)), on observe que la reprise du flux engendre une perturbation qui se traduit par une hausse abrupte des concentrations après le passage du pic de concentration. Le constat est le même pour l'expérience COL6PER3 vers 3300 min (Figure 37) où nous observons une légère hausse de la concentration sur la fin de la queue d'élution à la reprise du flux.

Pour les intensités de précipitation moyenne, la courbe en régime transitoire est proche de la forme des courbes obtenues en régime permanent pour les deux colonnes. La reproductibilité des données est meilleure à cette intensité de précipitation. L'interruption de flux engendre une perturbation de la concentration qui se traduit par une décroissance visible de la concentration à la reprise du flux. Là encore, l'interruption de flux ne semble pas avoir d'impact sur la forme de la queue d'élution, qui reste dans les gammes de valeurs observées pour les régimes permanents.

Les interruptions de flux peuvent se traduire ou non sur la courbe de percée par une perturbation significative des concentrations à la reprise du flux. Les perturbations semblent plus significatives avec l'augmentation de l'intensité de précipitation.

La chute de la concentration à la reprise du flux pour les expériences d'interruption de flux à 8 mm/h peut être interprétée comme le marqueur d'une rééquilibration de la concentration entre l'eau immobile et l'eau mobile par diffusion. Cet effet reste toutefois très limité. La rééquilibration de la concentration provoque une baisse de la concentration dans la partie mobile.

3.2.1.1.2 Interprétation de la dynamique hydrique des colonnes

Les observations du suivi instrumental montrent que les deux colonnes ont des dynamiques différentes. La colonne 6 montre une rééquilibration rapide du potentiel total. La rééquilibration du potentiel total se fait de façon homogène, sur toute la longueur de la colonne. La colonne 8 montre une inertie plus importante. La rééquilibration est plus lente, avec un retard important sur le tensiomètre intermédiaire ('mid'), ce qui confirme une forte hétérogénéité de la colonne. Les valeurs de teneur en eau données par la sonde ('bot') à 5 cm en dessous du tensiomètre intermédiaire ('mid') montrent des valeurs « anormales ». Cela qui nous indique que les valeurs transcrites par les sondes (teneur en eau et potentiel matriciel) reflètent une réalité physique dans cette partie de la colonne (-15 à 30 cm), et marque l'hétérogénéité de cette colonne.

3.2.1.2 Synthèse

Les expériences d'interruption de flux sans drainage ont montré que la forme globale des courbes de percée n'est guère déformée par l'interruption du flux. La déformation engendrée par l'interruption de flux reste limitée à la reprise du flux. La concentration à la reprise est légèrement moins importante qu'avant l'interruption de flux. C'est l'inverse des observations de Brusseau et al. (1997) qui réalisent l'interruption de flux après le passage du maximum du pic de concentration. Celui-ci observe une augmentation des concentrations à la reprise du flux, comme il a été observé pour les interruptions de flux involontaire de COL6PER3 et COL8PER2. Les perturbations sur la concentration suite à une interruption de flux sont plus importantes dans le cas de la colonne 8 que pour la colonne 6. Ce comportement pourrait être lié à une rééquilibration entre l'eau mobile et l'eau immobile durant l'interruption et expliquerait que la chute ou la hausse de concentration soit plus importante pour la colonne 8, dont les expériences en régime permanent ont montré que l'eau immobile était présente, que pour la colonne 6, dont les expériences en régime permanent ont montré que toute l'eau participait à l'écoulement, pour les intensités de précipitation faible et moyenne.

D'un point de vue instrumental, le potentiel total devient constant sur toute la profondeur de la colonne durant la phase d'interruption. Mais l'inertie entre les deux colonnes est différente: la rééquilibration est plus rapide pour la colonne 6 que pour la colonne 8, ce qui est cohérent avec l'hétérogénéité de la colonne 8.

3.2.2 Interruption de flux avec drainage de la colonne

3.2.2.1 Courbe de percée : Colonne 6

3.2.2.1.1 Scénario 1 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 4 mm/h pour le traceur C_0 est très déformée (Figure 52). Pendant la période de drainage, la concentration est stable et augmente légèrement en

fin de période. La reprise du flux se traduit par un point de concentration très important (le double de la concentration observée au moment du début de la phase de drainage). La courbe de percée pour le traceur C_1 a une forme proche des courbes de percées obtenues en régime permanent pour la même intensité de précipitation. Le taux de restitution pour le traceur C_0 (DFBA) est de 0,98 et le 0,97 pour le traceur C_1 (PFBA).

3.2.2.1.2 Scénario 2 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 8 mm/h pour le traceur C_0 est, elle aussi, très déformée (Figure 53). Pendant la période de drainage, la concentration augmente puis diminue légèrement jusqu'à la reprise du flux. Contrairement à l'expérience à 4 mm/h, nous n'observons pas de concentration plus élevée à la reprise du flux. La courbe de percée pour le traceur C_1 a une forme étroite. Les taux de restitution sont de 0,99 pour le traceur C_0 (DFBA) et de 0,95 pour le traceur C_1 (PFBA).

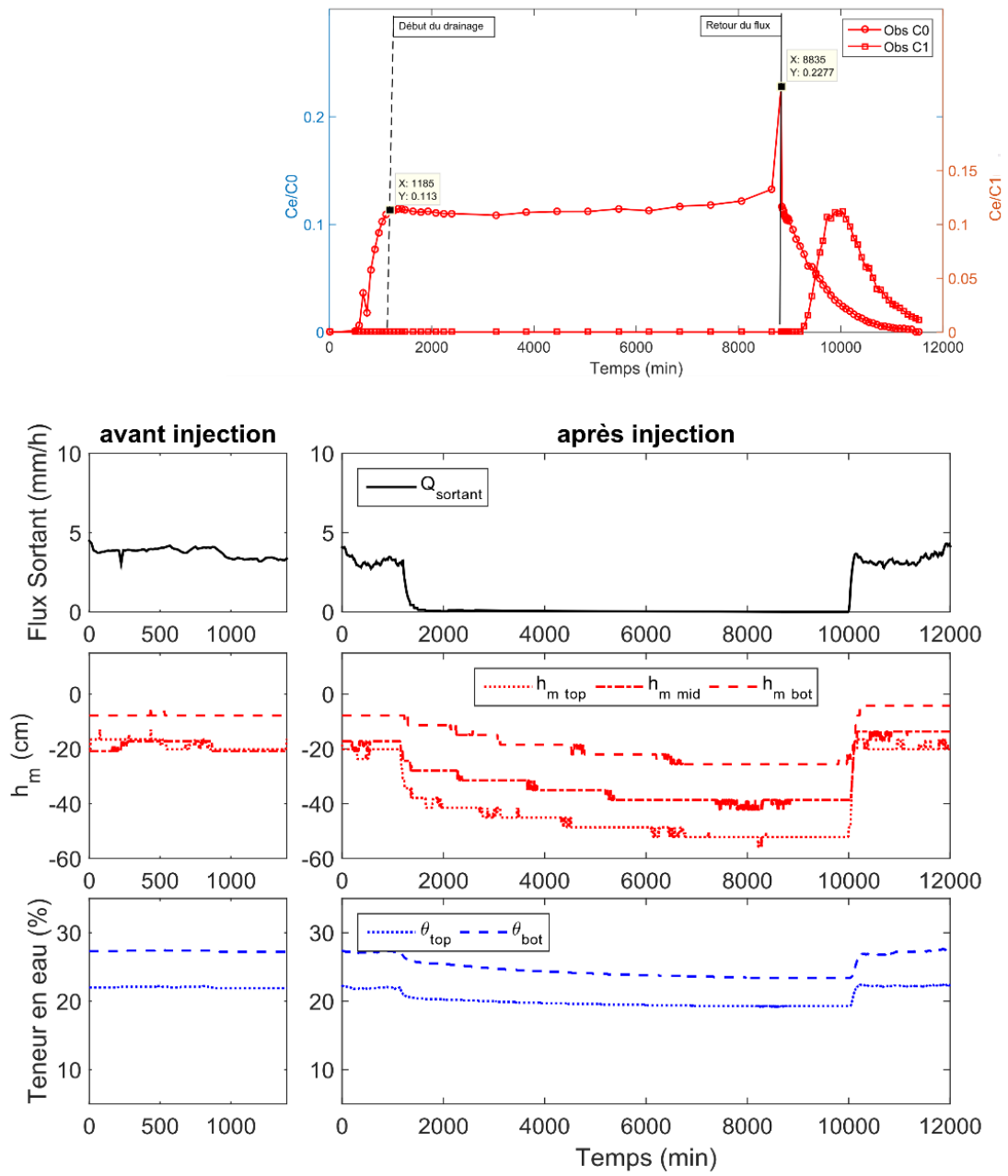


Figure 52: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°1 de colonne 6 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

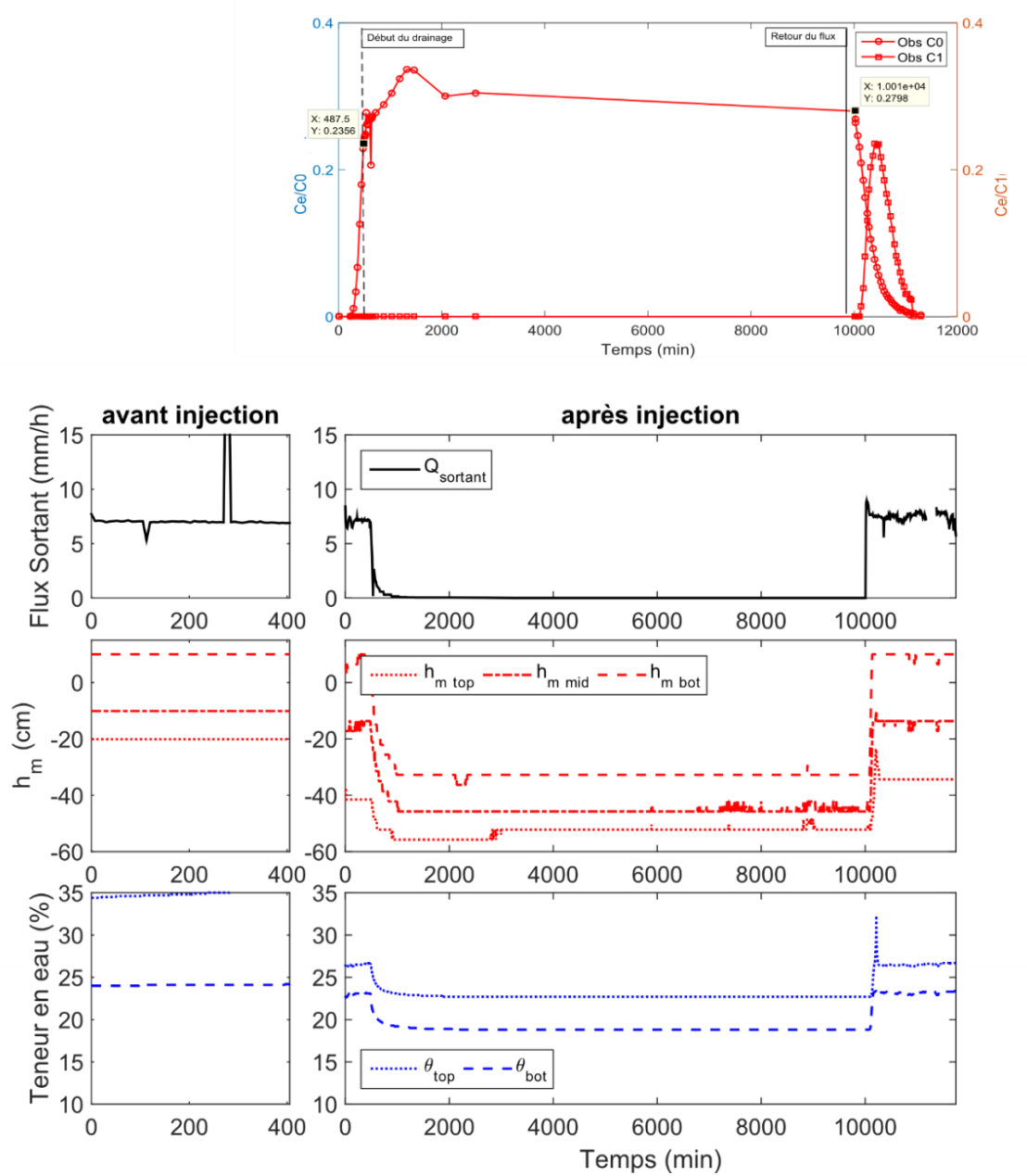


Figure 53: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°2 de colonne 6 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

3.2.2.1.3 Scénario 3 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin » puis reprise « par temps de chien »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 4 mm/h pour le traceur C_0 présente une allure encore différente des deux précédentes (Figure 54). Pendant toute la période de drainage, du début à la fin, la concentration augmente. La reprise du flux se traduit par un point de concentration élevée (1,5 fois de la concentration au moment du début de drainage). La courbe de percée pour le traceur C_1 a une forme étroite. Les taux de restitution sont de 0,94 pour le traceur C_0 (DFBA) et de 0,79 pour le traceur C_1 (PFBA).

3.2.2.1.4 Scénario 4 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien » puis reprise « par temps de crachin »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 8 mm/h pour le traceur C_0 a une allure similaire à la précédente (Figure 55). Pendant la période de drainage, la concentration augmente jusqu'à la fin de la période de drainage. La reprise du flux se traduit par un point de concentration élevée (près du double de la concentration au moment du début de drainage). La courbe de percée pour le traceur C_1 a une forme tassée. Les taux de restitution sont de 0,97 pour le traceur C_0 et de 0,84 pour le traceur C_1 (PFBA).

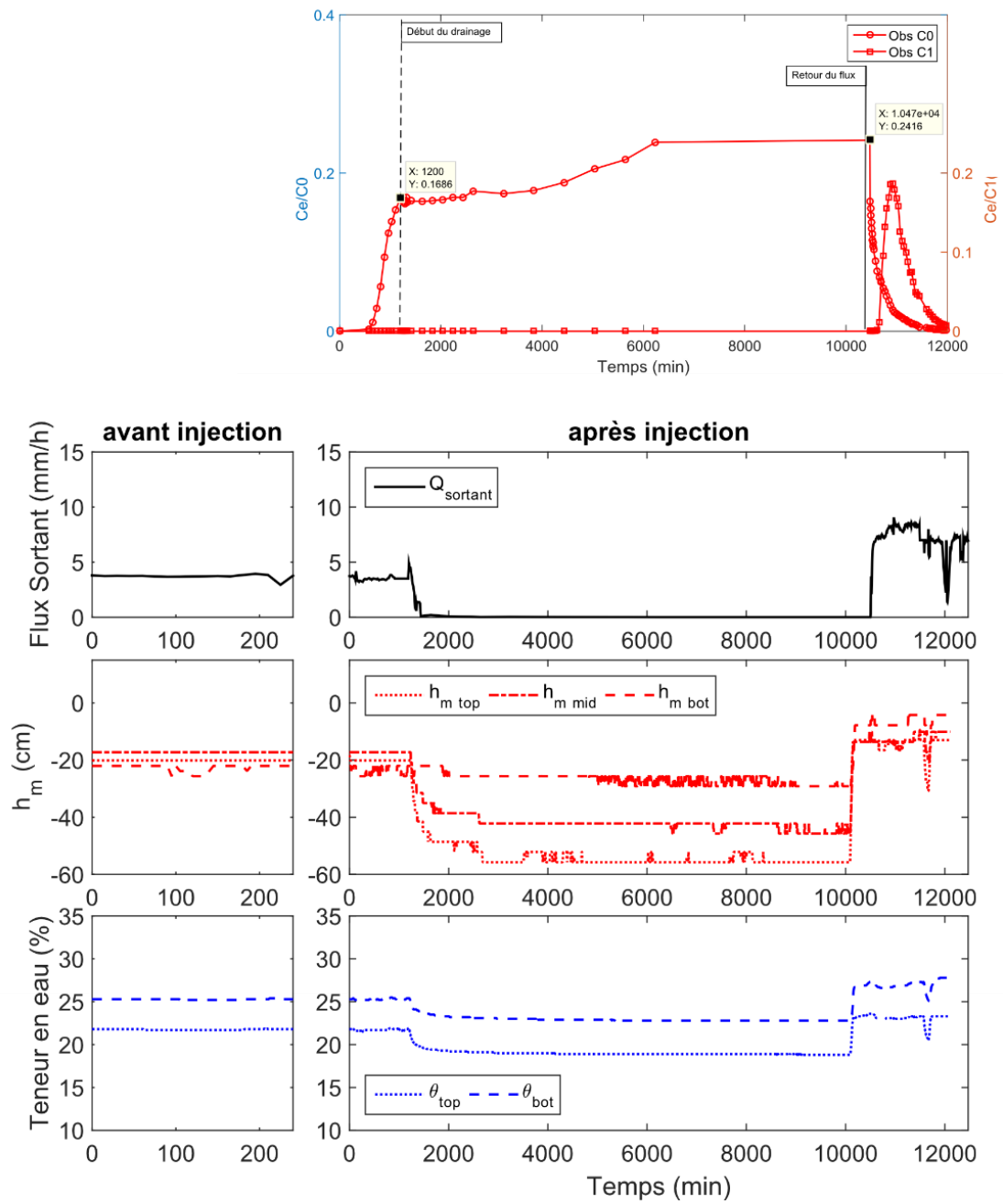


Figure 54: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°3 de colonne 6 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

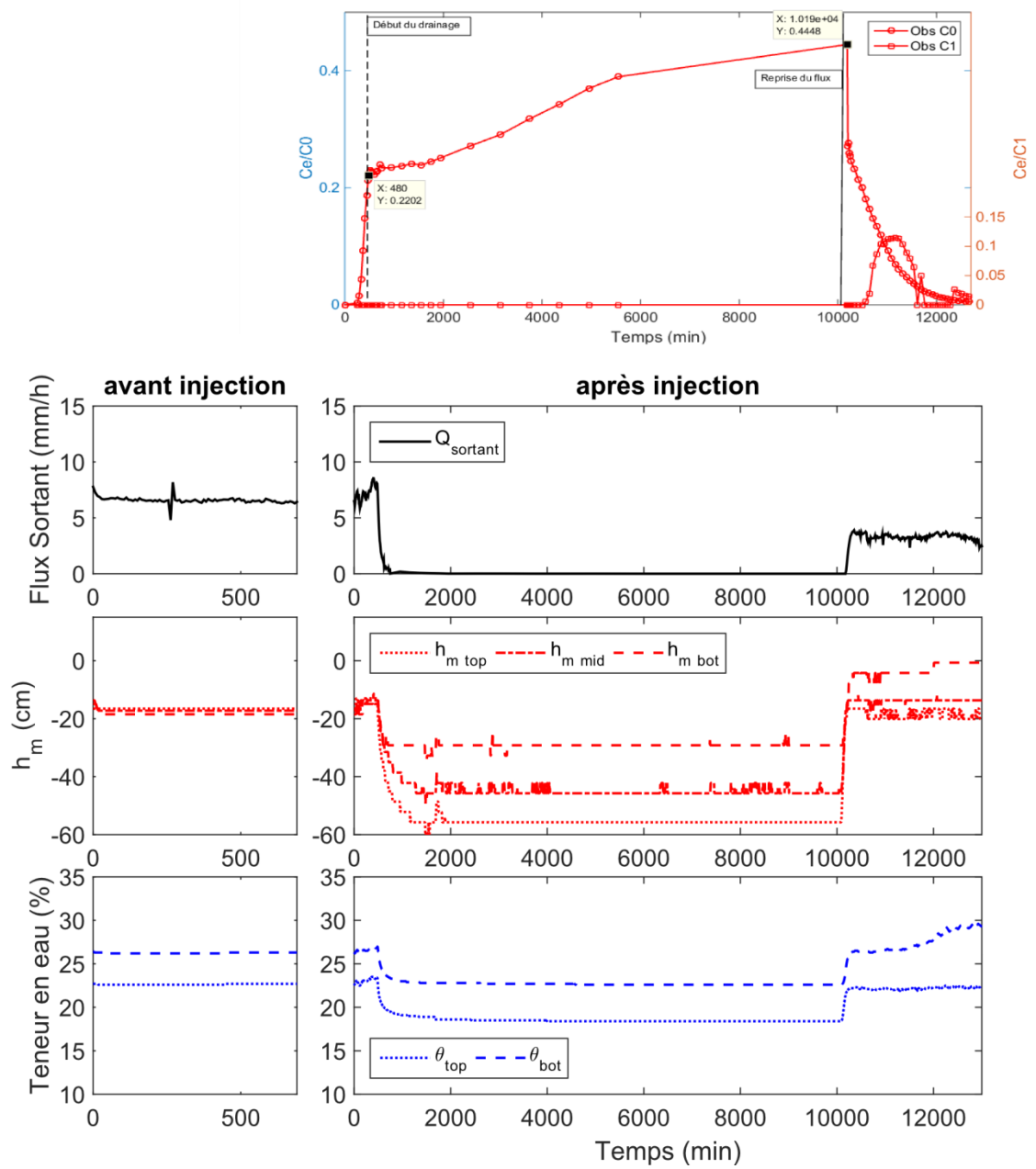


Figure 55: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°4 de colonne 6 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

3.2.2.2 Courbe de Percée : Colonne 8

3.2.2.2.1 Scénario 1 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 4 mm/h pour le traceur C_0 est assez peu déformée (Figure 56). Pendant la période de drainage, la concentration augmente très légèrement jusqu'à la fin de la période de drainage. La reprise du flux se traduit par un point de concentration plus bas que le dernier point de concentration obtenu pendant la période de drainage, mais ce point reste légèrement plus concentré que le point de concentration en début de drainage. Dû à un dysfonctionnement à l'injection, le traceur C_1 n'a pas été injecté dans le système. Le taux de restitution du traceur C_0 est de 0,96.

3.2.2.2.2 Scénario 2 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 8 mm/h pour le traceur C_0 est très déformée (Figure 57). Pendant la période de drainage, la concentration diminue légèrement au début puis augmente jusqu'à la fin de la période de drainage. La reprise du flux se traduit par un point de concentration plus bas que le dernier point de concentration obtenu pendant la période de drainage, mais ce point reste plus concentré que celui observé en début de drainage. La courbe de percée pour le traceur C_1 décrit une courbe proche de la courbe de percée obtenue en régime permanent pour l'intensité de précipitation correspondante (8 mm/h). Le taux de restitution est de 0,98 pour le traceur C_0 (DFBA) et de 0,99 pour le traceur C_1 (PFBA).

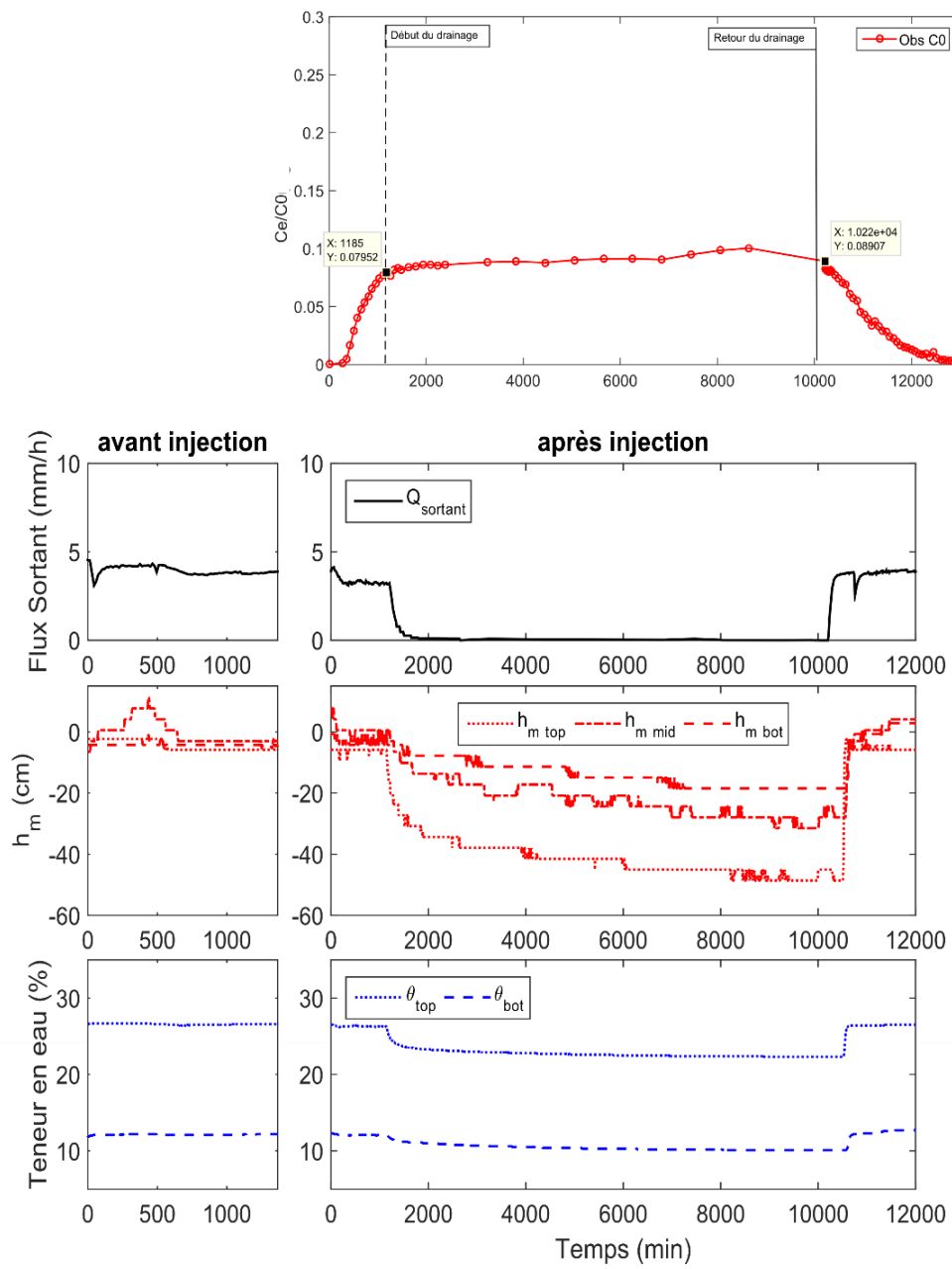


Figure 56: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°1 de colonne 8 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

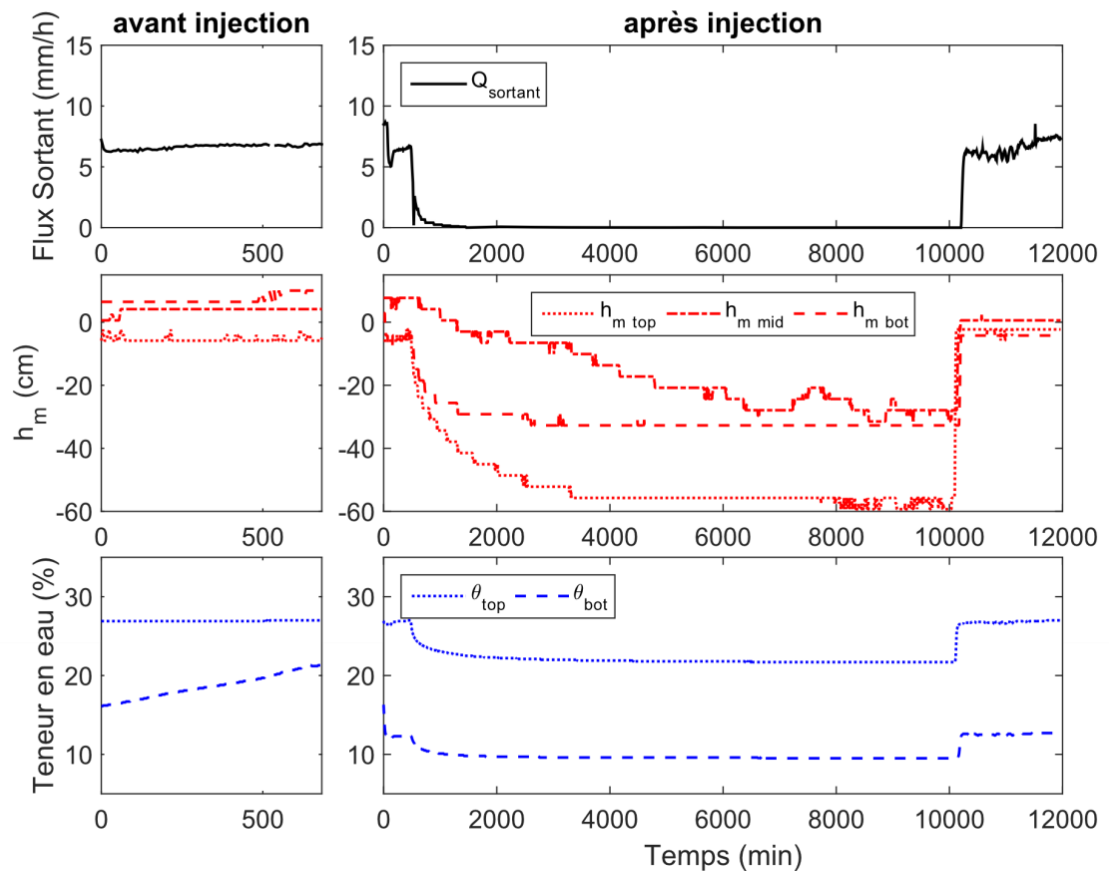
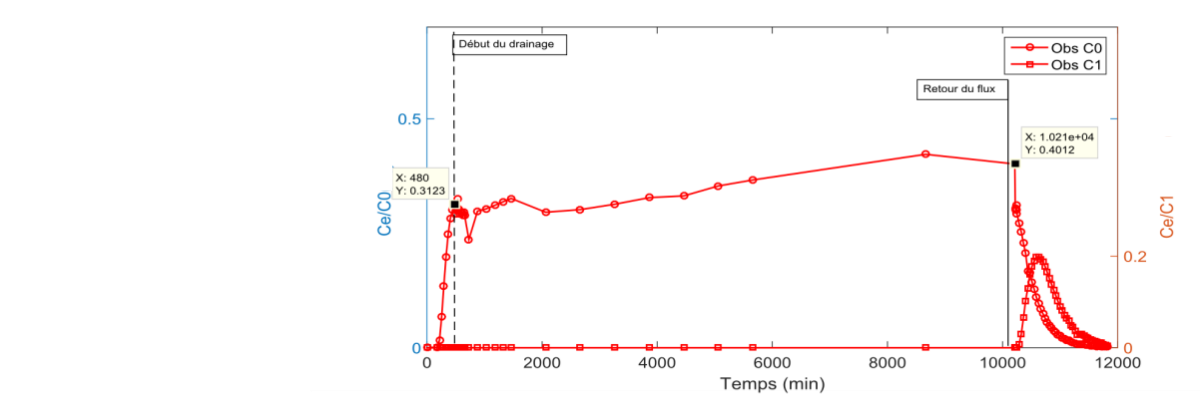


Figure 57: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°2 de colonne 8 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

3.2.2.2.3 Scénario 3 : Interruption de flux avec drainage « par temps de crachin » puis reprise « par temps de chien »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 4 mm/h puis reprise à 8 mm/h pour le traceur C_0 est assez déformée (Figure 58). Pour cette expérience, l'interruption de flux intervient après le pic d'élution à la différence des autres expériences. Pendant la période de drainage, la concentration baisse puis augmente jusqu'à la fin de la période de drainage. La reprise du flux se traduit par un point de concentration plus élevé. La courbe de percée pour le traceur C_1 a un pic assez étroit avec des concentrations plus importantes que la courbe de percée observée pour le traceur C_0 . Le taux de restitution est de 0,67 pour le traceur C_0 (PFBA) et de 0,85 pour le traceur C_1 (DFBA).

3.2.2.2.4 Scénario 4 : Interruption de flux avec drainage « par temps de chien » puis reprise « par temps de crachin »

La courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage à 8 mm/h puis reprise à 4 mm/h pour le traceur C_0 est très déformée (Figure 59). Comme observé pour l'expérience précédente, pendant la période de drainage, la concentration diminue d'abord puis augmente jusqu'à la fin de la période de drainage. La reprise du flux se traduit par un point de concentration maximum. La courbe de percée pour le traceur C_1 décrit une courbe de percée moins étroite que l'expérience précédente. Pendant la période d'interruption de flux, les valeurs de teneur en eau et de potentiel matriciel présentent un pic (vers $t = 4000$ min) qui pourrait être dû à un apport d'eau suite à une perte de pression dans l'enceinte du simulateur de pluie. Le taux de restitution est de 0,78 pour le traceur C_0 (DFBA) et de 0,93 pour le traceur C_1 (PFBA).

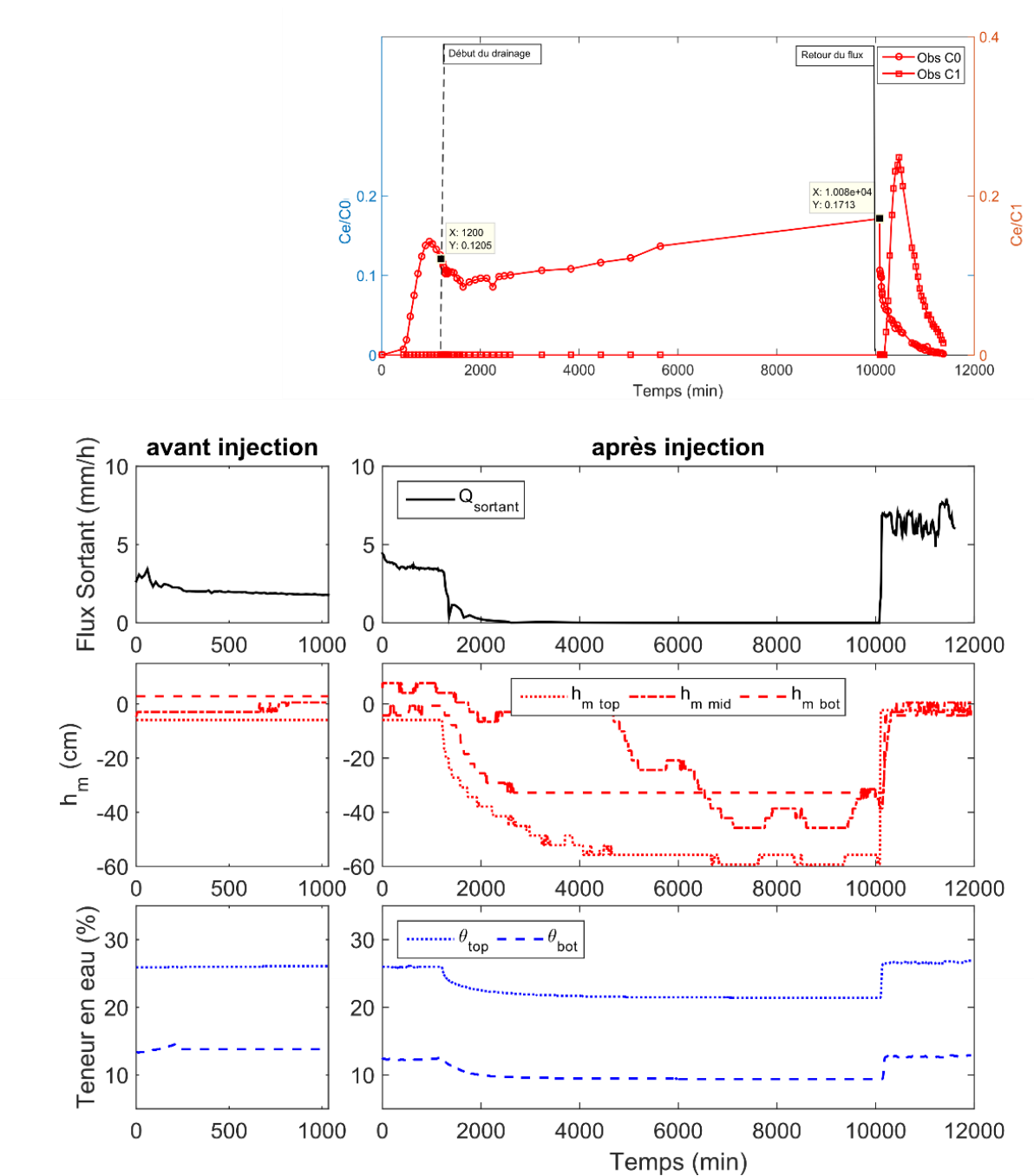


Figure 58: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°3 de colonne 8 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

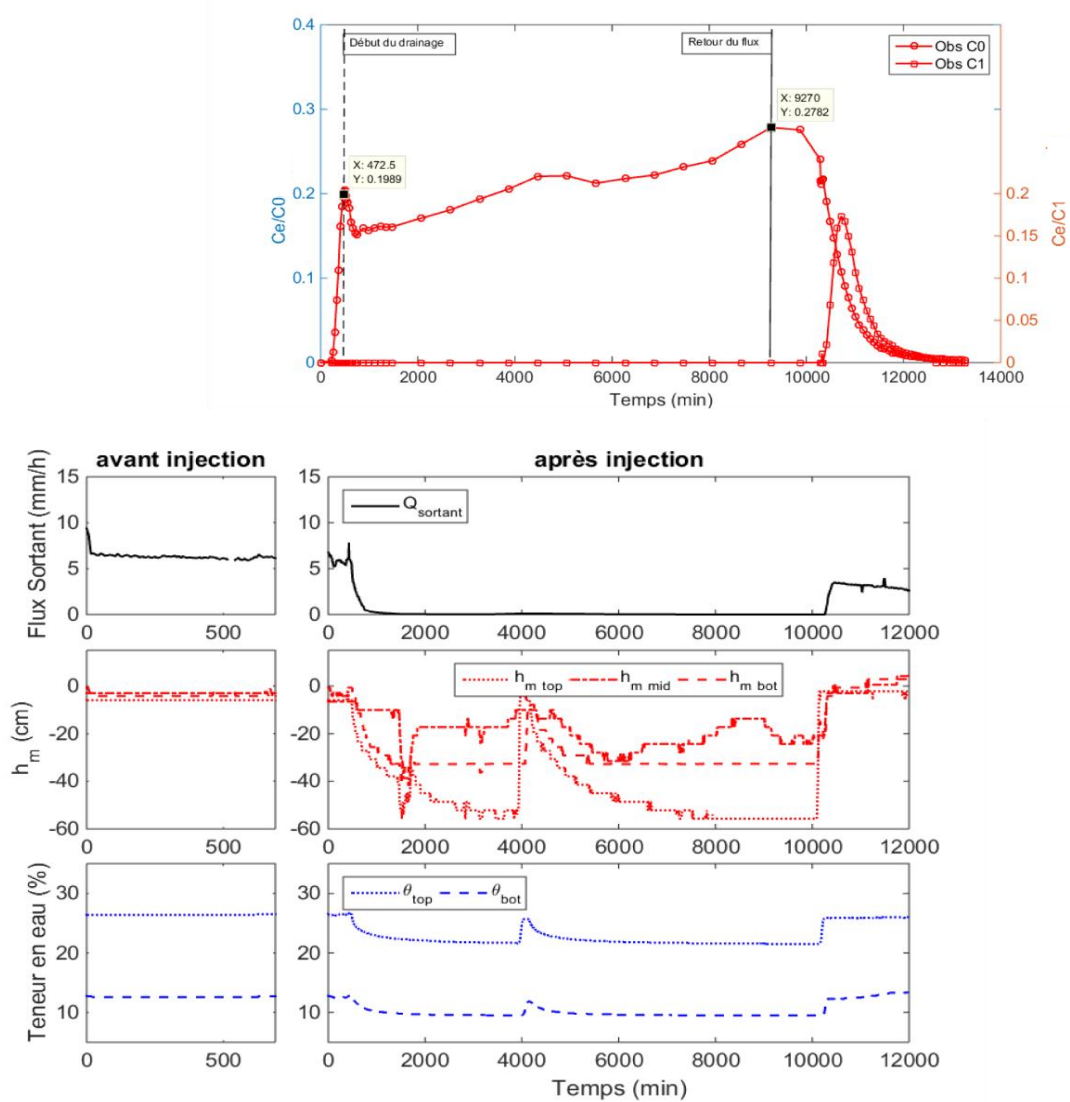


Figure 59: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°4 de colonne 8 en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage.

3.2.2.3 Suivi instrumental

3.2.2.3.1 Colonne 6

On observe dans les quatre phases de drainage, que le potentiel total se rééquilibre et tend vers un profil vertical (Figure 60). Le $T_{0 \text{ min}}$ est le temps où se fait l'interruption de flux et toutes les autres dates sont des temps relatifs à cette date. Sur les expériences COL6Dr1, COL6Dr3, COL6Dr4 à $T_{0 \text{ min}}$, le potentiel total est plus important en haut de la colonne. L'eau s'écoule des potentiels totaux les plus forts vers les potentiels les plus faibles. L'eau s'écoule du haut vers le bas de la colonne, le profil de potentiel total est de type normal. L'expérience COL6Dr2 décrit un profil de potentiel total inversé ce qui est incohérent et n'a pas pu être expliqué.

3.2.2.3.2 Colonne 8

Dans la colonne hétérogène (colonne 8), on observe un retard important du tensiomètre intermédiaire ('mid') (-15 cm de profondeur) comme cela a été observé lors des expériences avec interruption de flux sans drainage (Figure 61). Le potentiel total à $T_{1075 \text{ min}}$ après l'interruption de flux n'est toujours pas à l'équilibre. Les valeurs de potentiel total se décalent progressivement vers la gauche. Le tensiomètre 'mid' suit le comportement global de la colonne mais avec une inertie par rapport aux autres tensiomètres.

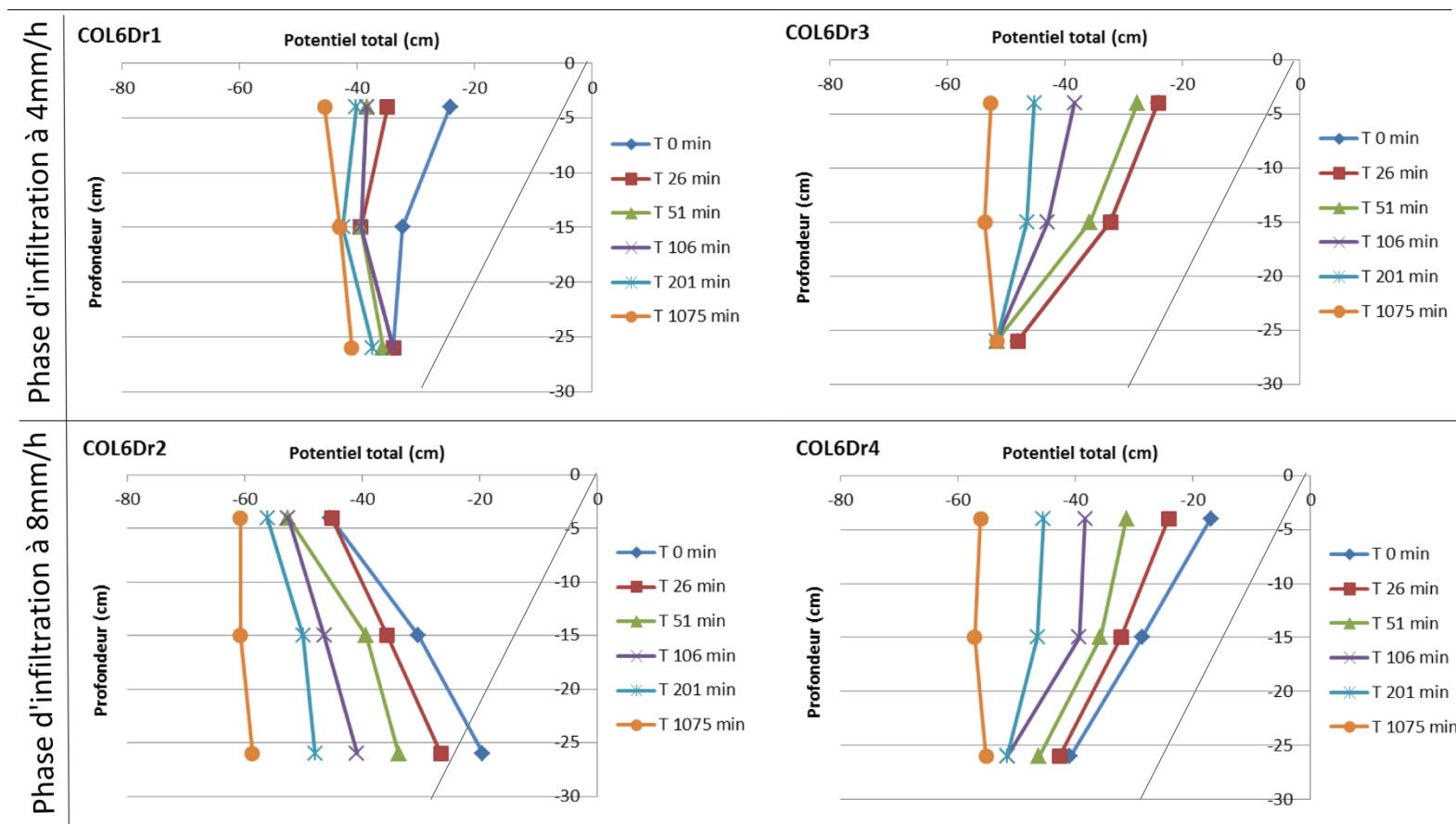


Figure 60: Evolution du potentiel total au cours des phases de drainage de la colonne 6

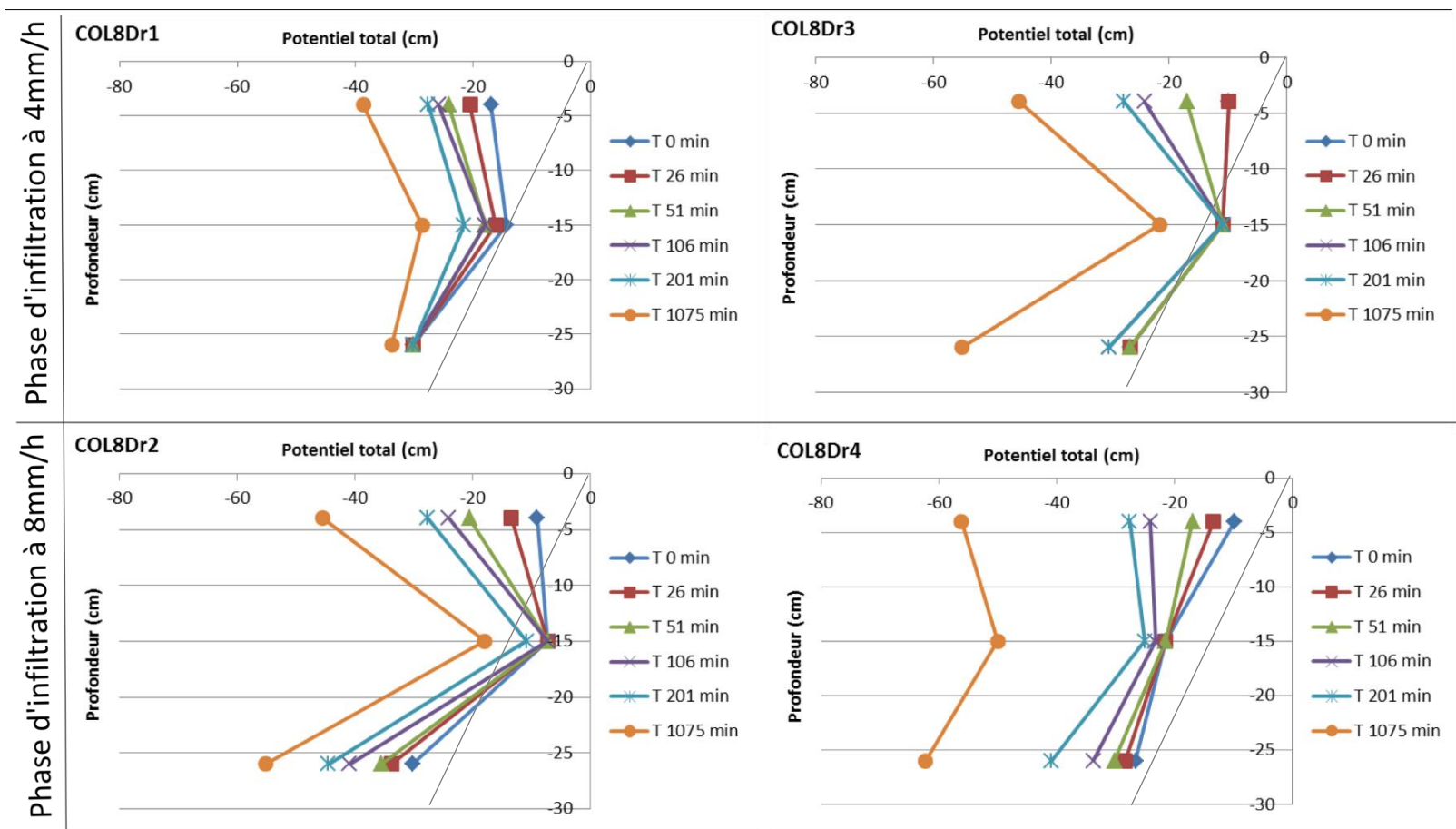


Figure 61: Evolution du potentiel total au cours des phases de drainage de la colonne 8.

3.2.2.3.3 Estimation de $K(h)$

Les phases de drainage permettent d'estimer une conductivité hydraulique pour chaque degré de désaturation. Celles-ci sont calculées aux mêmes dates que le suivi des profils du potentiel total ($t = 0$ min, $t = 26$ min, $t = 51$ min, $t = 106$ min, $t = 206$ min, et $t = 1075$ min après l'interruption de flux).

La Figure 62 montre une estimation de $K(h)$ pour la colonne 6 à la profondeur 15 cm. On observe que les données du drainage issues de l'expérience Col6Dr2 ne sont pas cohérentes avec les trois autres essais. Le profil de potentiel total de cette expérience est lui aussi incohérent (Figure 60).

Les valeurs obtenues pour les autres essais de drainage sont proches. $K(h)$ semble décroître rapidement entre pF 1,65 et pF 1,8.

$K(h)$ Col6Dr

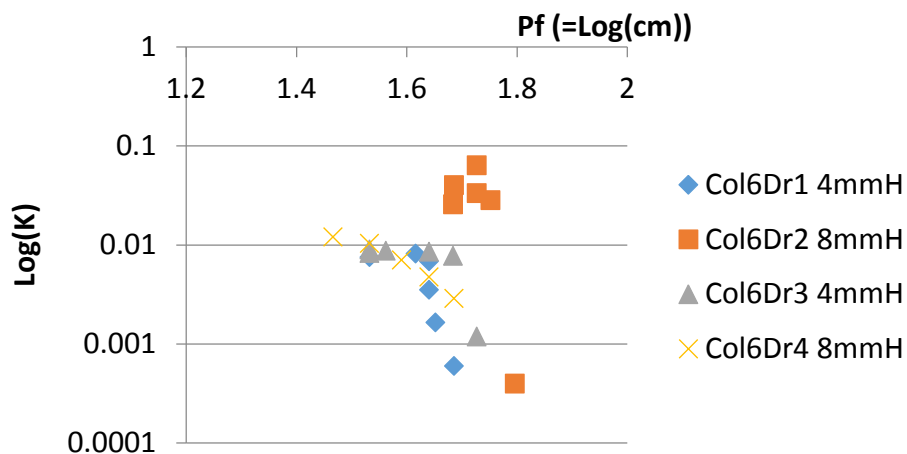


Figure 62 : Estimation de $K(h)$ à la profondeur moyenne (15 cm) de la colonne 6.

La Figure 63 montre une estimation de $K(h)$ à la profondeur 15 cm pour la colonne 8. Les estimations de $K(h)$ sont très proches pour les quatre phases de drainage. $K(h)$ semble décroître rapidement entre pF 1,5 et pF 1,6, mais la gamme de variation est moins importante pour la colonne 6.

K(h) Col8Dr

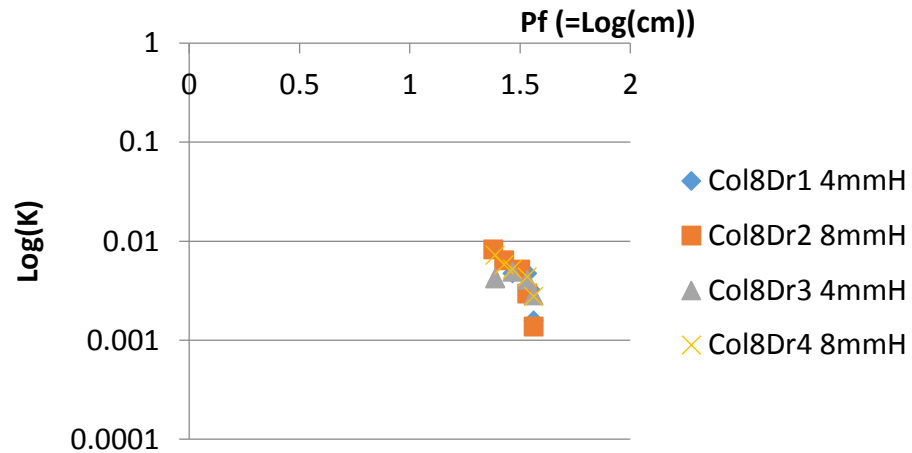


Figure 63: Estimation de K(h) à la profondeur moyenne (15 cm) de la colonne 8

Ces observations sont cohérentes avec l'analyse faite en régime permanent (Figure 42(D) et Figure 43(D), (§3.1.1.5)) qui montrait déjà une évolution de $K(h_m)$ différente pour les deux colonnes.

3.2.2.4 Discussion

3.2.2.4.1 Déformation de la courbe de percée du traceur C_0

Le tracé des courbes de percée du traceur C_0 (DFBA) sont proches de la forme des courbes mesurées en régime permanent et transitoire d'interruption de flux sans drainage (Figure 64 et Figure 65). La déformation localisée durant la phase d'interruption de flux, provoque des variations de la concentration différentes selon les essais, sans qu'il soit possible d'y trouver une logique liée aux conditions de flux imposée. Les augmentations de concentration observées pourraient être liées à l'arrivée du maximum du pic de concentration, mais la courbe Col8Dr3 montre que ce comportement peut advenir même après l'arrivée du maximum du pic de concentration.

On observe tout de même une tendance à l'augmentation de la concentration en soluté lors de l'interruption avec drainage, ce qui rejoint les observations

de Cote et al. (2000), qui montrent que l'interruption de flux favorise la lixiviation des solutés, par rapport à un écoulement en régime permanent.

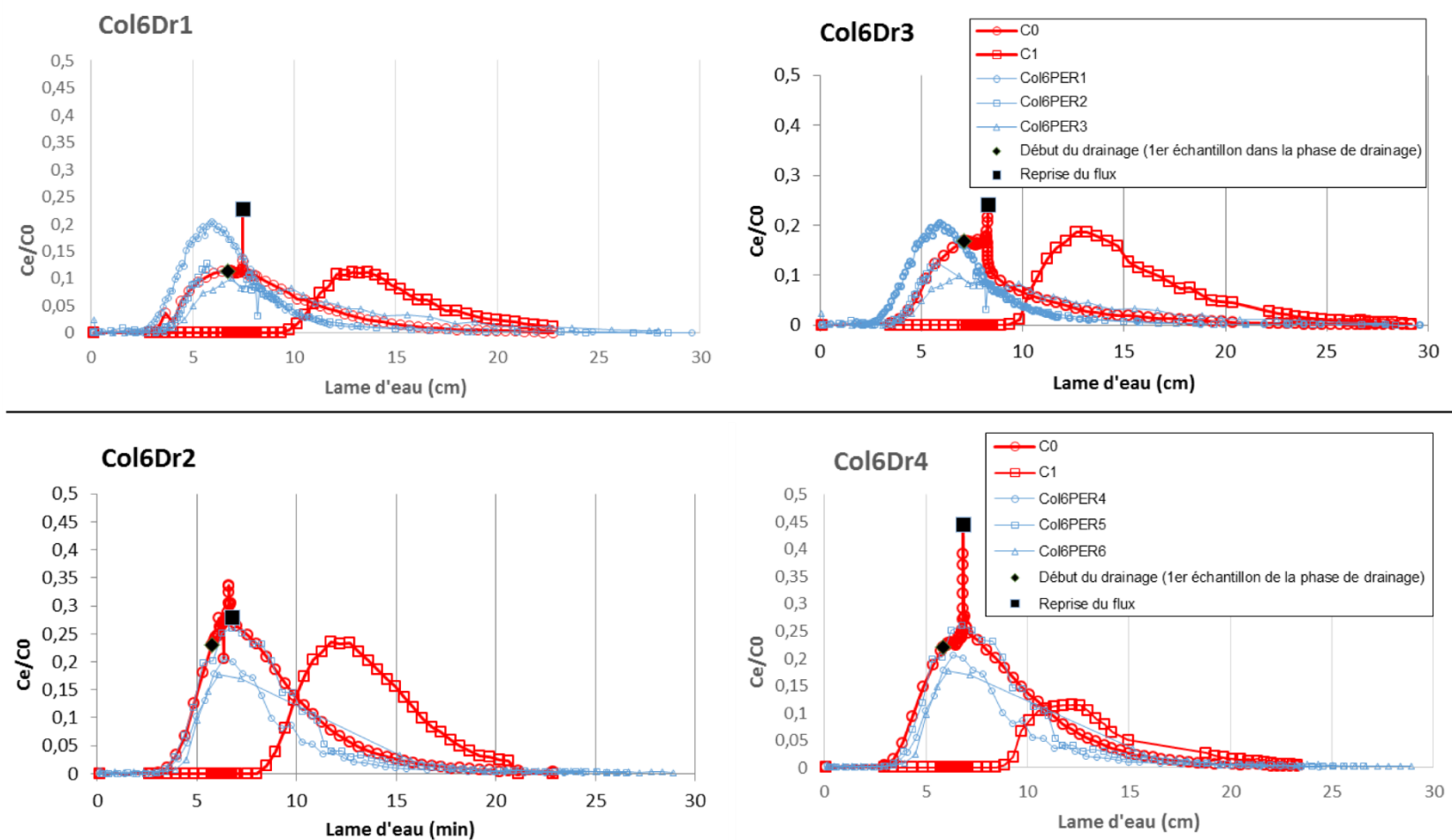


Figure 64: Courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage pour les quatre expériences de drainage de la colonne 6

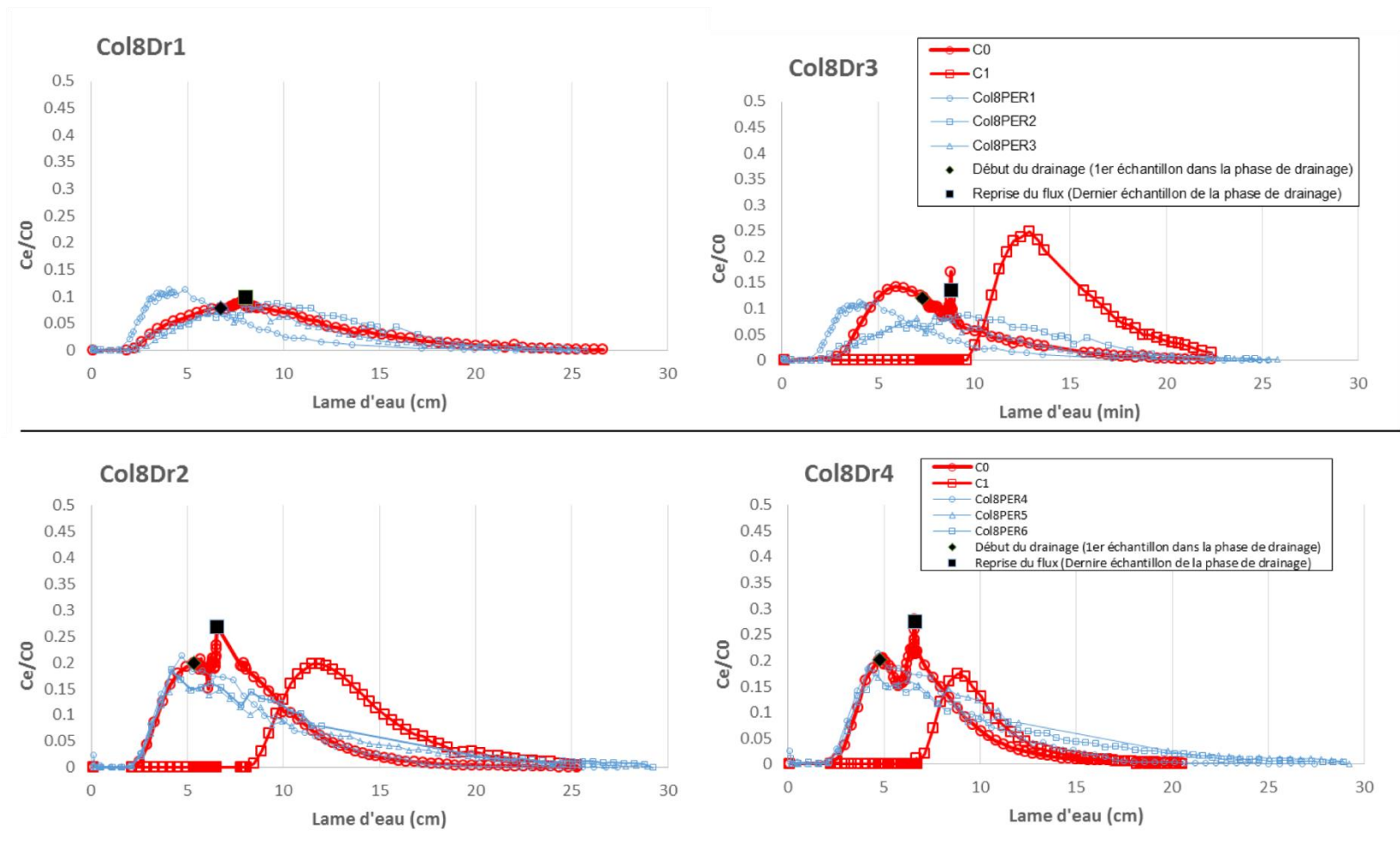


Figure 65: Courbe de percée en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage pour les quatre expériences de drainage de la colonne 8

3.2.2.4.2 Déformation de la courbe de percée du traceur C₁

3.2.2.4.2.1 Colonne 6

Les comparaisons des courbes de percée pour le traceur C₁ (injecté à la reprise du flux après la phase de drainage) montrent que la forme de la courbe est plus proche de celles observées pour les essais régimes Col6PER2 et Col6PER3 (Figure 66). Les deux courbes (Col6Dr1 et Col6Dr4) sont décalées vers la gauche par rapport au régime permanent. La Col6Dr4 est plus précoce que la Col6Dr1.

Les courbes de percée Col6Dr3 et Col6Dr2 pour le traceur C₁ montrent aussi un décalage vers la gauche (Figure 67) par rapport aux essais faits en régime permanent. La Col6Dr3 est plus décalée vers la gauche que la Col6Dr2. Ce décalage des courbes vers la gauche est en lien avec la densité de flux appliquée en première période. Lorsque la densité de flux varie entre la phase initiale et la phase de reprise du flux alors la courbe de percée du traceur C₁ devance la courbe de percée obtenue pour une densité de flux constante. A l'injection du traceur C₁, la colonne a été drainée, la teneur en eau est donc plus faible à la reprise du flux que pour les essais à flux constant. La section d'écoulement est donc moins importante, la vitesse porale est plus importante et le soluté arrive plus rapidement.

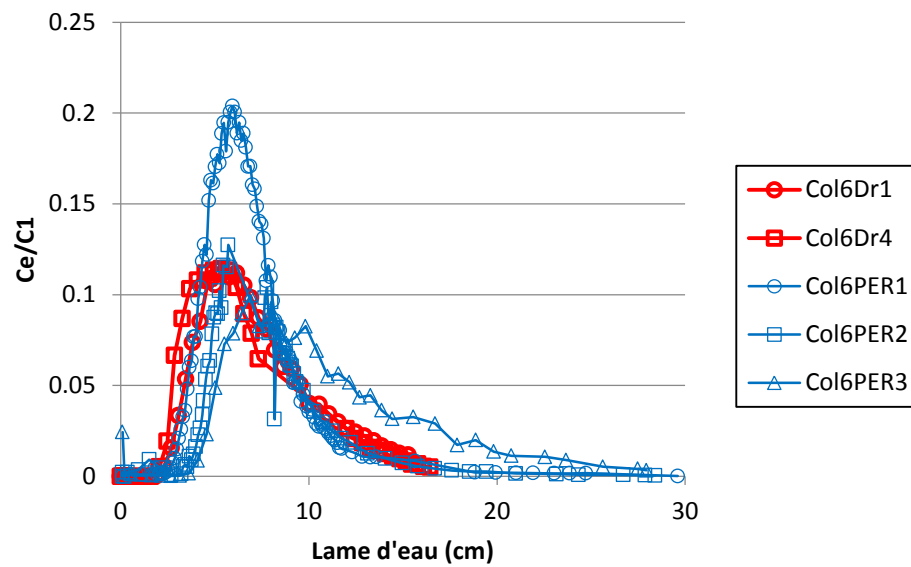


Figure 66: Courbe de percée du traceur C_1 (PFBA) après une phase de drainage et une reprise du flux à 4 mm/h

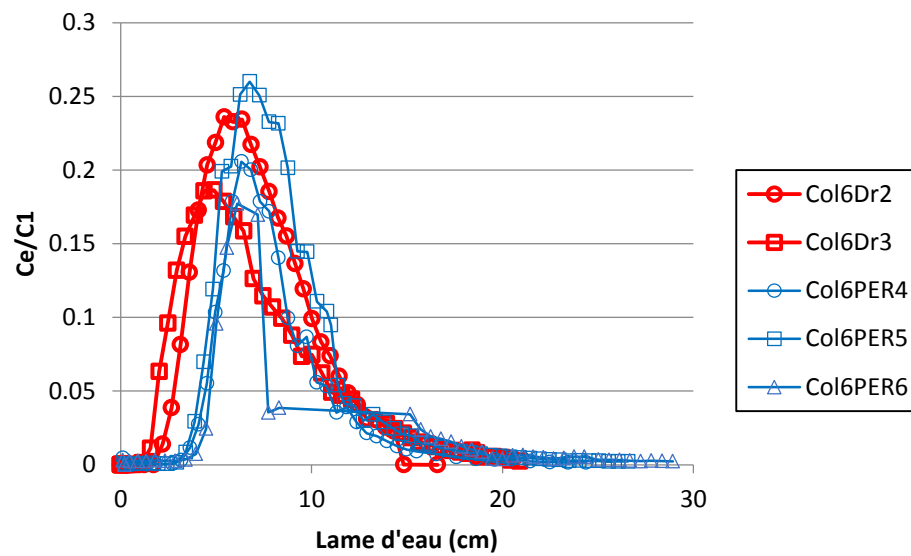


Figure 67: Courbe de percée du traceur C_1 (PFBA) après une phase de drainage et une reprise du flux à 8 mm/h

3.2.2.4.2.2 Colonne 8

La courbe (Col8Dr4) est fortement décalée vers la gauche par rapport au régime permanent (Figure 68). Le tracé de courbe de percée Col8Dr3 et Col8Dr2 pour le traceur C_1 montre aussi un décalage vers la gauche (Figure 69). Contrairement à la colonne 6, la courbe Col8Dr3 n'est pas plus décalée

que la courbe Col8Dr2. L'erreur de manipulation lors de l'injection du traceur C_1 lors de l'expérience Col8Dr1 n'a pas permis d'observer le comportement du traceur C_1 pour l'interruption de flux à 4 mm/h.

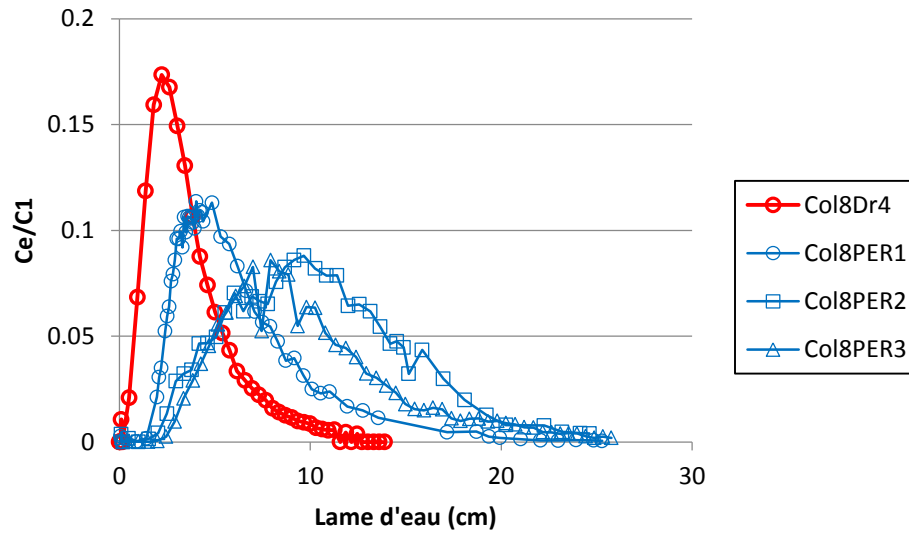


Figure 68: Courbe de percée du traceur C_1 (PFBA) après une phase de drainage et une reprise du flux à 4 mm/h.

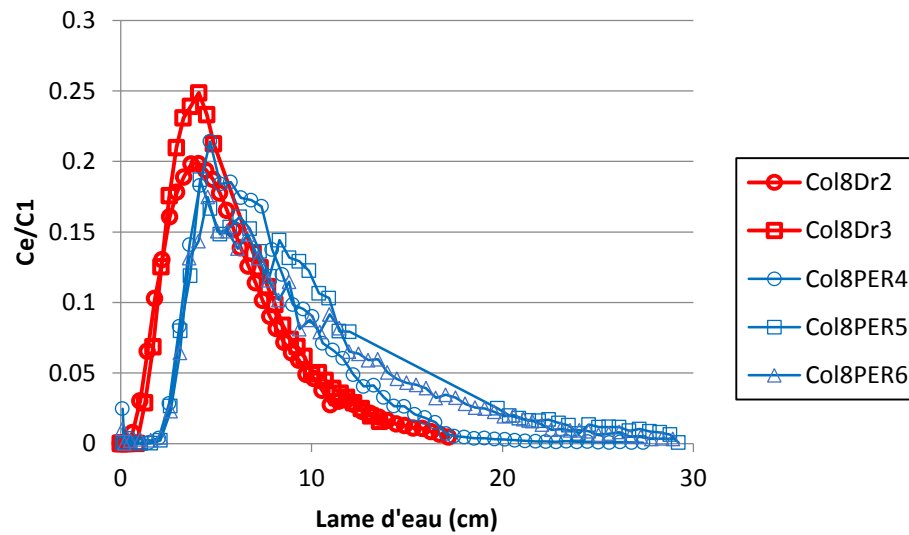


Figure 69: Courbe de percée du traceur C_1 (PFBA) après une phase de drainage et une reprise du flux à 8 mm/h.

3.2.2.5 Synthèse

Les expériences en régime transitoire avec une interruption de flux avec drainage à la base de la colonne ont permis de mettre en évidence des comportements très atypiques.

Comme pour les expériences d'interruption de flux sans drainage, la déformation de la courbe de percée est localisée. Celle-ci se concentre pendant l'interruption de flux et à la reprise du flux. Contrairement aux expériences d'interruption de flux sans drainage, les expériences avec drainage ne présentent pas de concentration inférieure à la reprise du flux. La concentration à la reprise du flux est toujours supérieure à la concentration mesurée avant l'interruption du flux. En revanche, durant toutes les phases de drainage de la colonne 8, hormis COL8Dr1, les interruptions de flux s'accompagnent d'une baisse plus ou moins importante de la concentration avant d'observer une forte augmentation dans la suite de la phase de drainage. Pour la colonne 6, aucune baisse de concentration n'est observée avant l'augmentation jusqu'à la fin de la phase de drainage.

La forme des courbes de percée durant la phase de drainage est difficilement explicable à l'aide d'un modèle d'écoulement de type MIM. L'augmentation de la concentration durant la phase de drainage s'explique par l'hétérogénéité de la concentration en soluté au niveau de la section d'écoulement. La distribution du soluté au sein de la section d'écoulement est contrôlée par la taille des pores. Le drainage vidange en premier lieu les pores de grande taille lorsqu'ils sont présents (cas de la colonne 8), dans lesquels le soluté n'est plus présent et engendre une dilution de la concentration qui se traduit par une baisse légère de la concentration durant la première partie du drainage. Le drainage vidange ensuite des pores de taille de moins en moins grande où le soluté est plus concentré, ce qui se traduit par l'augmentation progressive de la concentration dans la seconde phase du drainage (cas de la colonne 6 et 8).

Cette hypothèse de fonctionnement peut aussi expliquer les courbes en interruption de flux sans drainage, les sauts de concentration à la reprise du flux pouvant s'expliquer par une redistribution des concentrations pendant l'interruption de flux aux seins des différentes tailles de pores.

Le suivi du potentiel total montre des potentiels de plus en plus négatifs avec la durée du drainage ainsi qu'une rééquilibration du profil de potentiel total. Le profil de potentiel total devient vertical dans les deux colonnes, si l'on met à part le tensiomètre intermédiaire ('mid') de la colonne 8.

Il est observé dans le cas de la colonne homogène que la variation de d'intensité de précipitation et l'effet lié au drainage préalable de la colonne à la reprise du flux engendrent une arrivée encore plus précoce de la courbe de percée du second traceur (Figure 69 : Col6Dr4 vs. Col6Dr1 et Figure 67 : Col6Dr3 vs. Col6Dr2). Dans le cas de la colonne hétérogène, la variation d'intensité de précipitation ne semble pas engendrer d'arrivée précoce du soluté (Figure 69 : Col8Dr3 vs. Col8Dr2).

3.3 Résultats des caractérisations des colonnes

Cette partie présente les résultats obtenus après le traçage au bleu brillant sur les colonnes. Cette expérience a pour but d'observer les chemins d'écoulements à l'intérieur des deux colonnes. A la suite du traçage au bleu brillant, les colonnes sont découpées. Les découpes sont échantillonnées et caractérisées.

3.3.1 Caractérisation de la colonne avant la découpe

3.3.1.1 Colonne 6

3.3.1.1.1 Suivi de la concentration

La Figure 70 décrit la concentration en BB mesurée par spectrophotométrie en sortie de la colonne 6 avant la découpe. La concentration C_e/C_0 est très faible, comparée au rapport observé dans l'ensemble des expériences précédentes, le taux de restitution est faible 0,63 %. La grande partie du BB est encore dans la colonne, la masse injectée au sommet de la colonne est estimée à 1,44 g. Durant la phase de drainage (à -25 cm), la concentration en BB continue d'augmenter pendant 60 min puis la concentration reste stable. Le changement de potentiel à la base de la colonne, de -25 à -50 cm, engendre la récupération d'un petit volume d'eau, tandis que le potentiel matriciel et la teneur en eau ne varient plus.

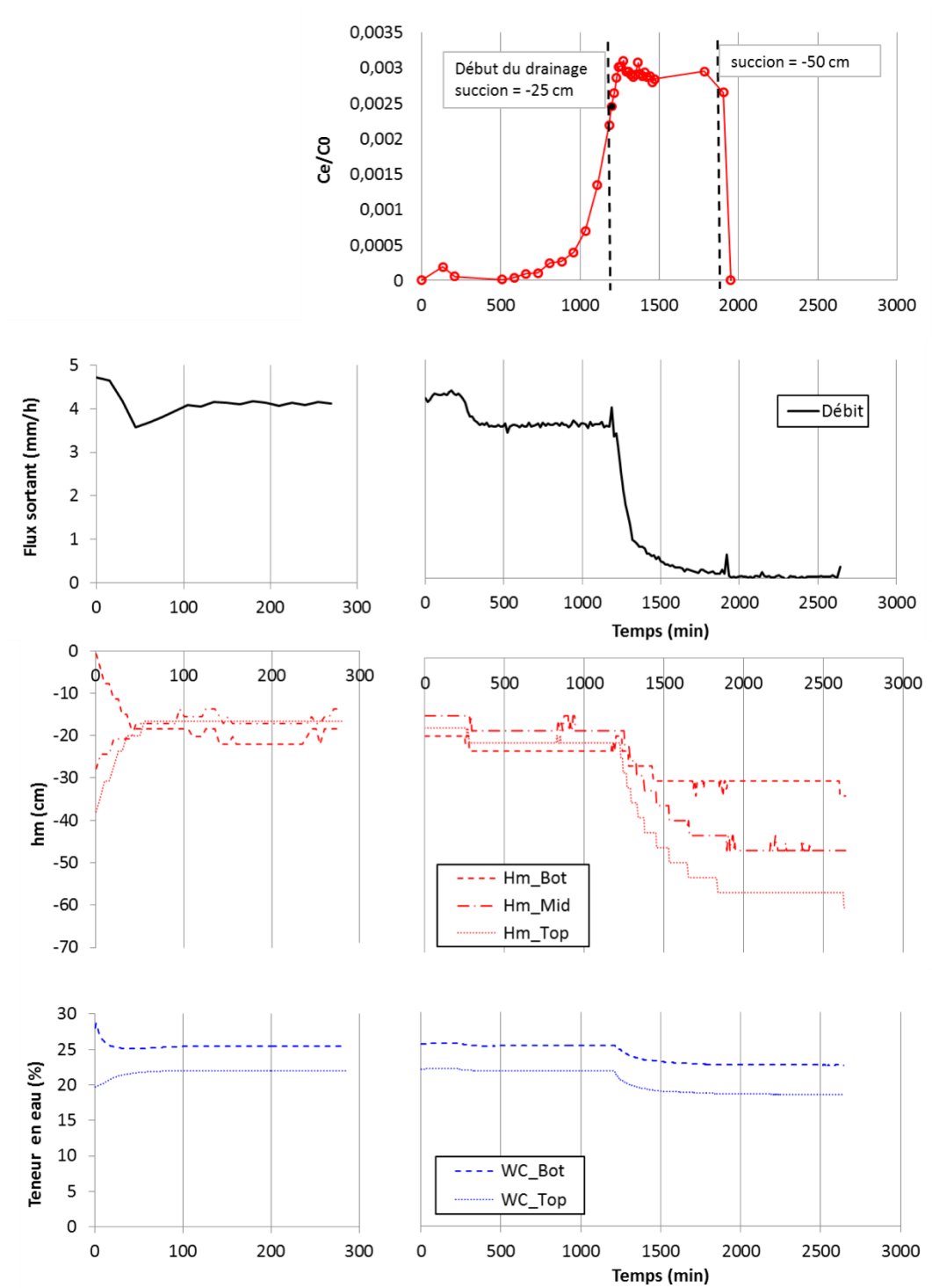


Figure 70: Courbe de percée (en haut) et suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'éluion finale du bleu brillant dans la colonne 6.

3.3.1.1.2 Suivi instrumental

La colonne est ensuite découpée en couche et chacune des couches est séchée. L'estimation de la teneur en eau au moment de la découpe est obtenue par séchage. Le suivi du débit au cours de l'expérience et le suivi de la teneur en eau permettent d'estimer la teneur en eau réelle de la colonne et de la comparer à celle issue des mesures réalisées par les sondes.

Le Tableau 14 présente les estimations de la teneur en eau pour chacune des deux phases de drainage (-25 cm et -50 cm). Ce tableau montre, pour la colonne 6, que les sondes estiment correctement les teneurs en eau, puisque l'erreur est très faible (moins de 1 %).

Tableau 14: Estimation de la validité des mesures des teneurs en eau réalisées par les sondes par suivi du débit et par séchage de la colonne 6.

	Volume d'eau	$\Delta\theta$	θ_{moy} mesurée (capteurs)	θ_{moy} réelle	Erreur
	(ml)	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)
Final (-50 cm)	16,32	0,00173	0,204	0,205*	- 0,001
- 25 cm	247,82	0,0262	0,205	0,206**	- 0,001
Avant drainage (4mm/h)			0,235	0,233**	+ 0,002

*teneur en eau obtenue par séchage de la colonne, **teneur en eau obtenue par séchage + teneur en eau drainée

3.3.1.2 Colonne 8

3.3.1.2.1 Suivi de la concentration

Cette expérience a subi une forte avarie durant sa réalisation. Une panne de courant au cours de la nuit n'a pas permis d'atteindre le même état hydrique au moment de la découpe que pour la colonne 6.

La Figure 71 décrit la concentration du BB mesurée par spectrophotométrie avant la découpe de la colonne 8. La phase de drainage (à -25 cm) débute 10 h avant l'heure initialement prévue. La concentration du BB chute pendant la phase de drainage. Le changement de potentiel matriciel à la base de la

colonne engendre une hausse des volumes d'eau récupérés et une augmentation de la concentration, illustrée par un épaulement sur la courbe de percée.

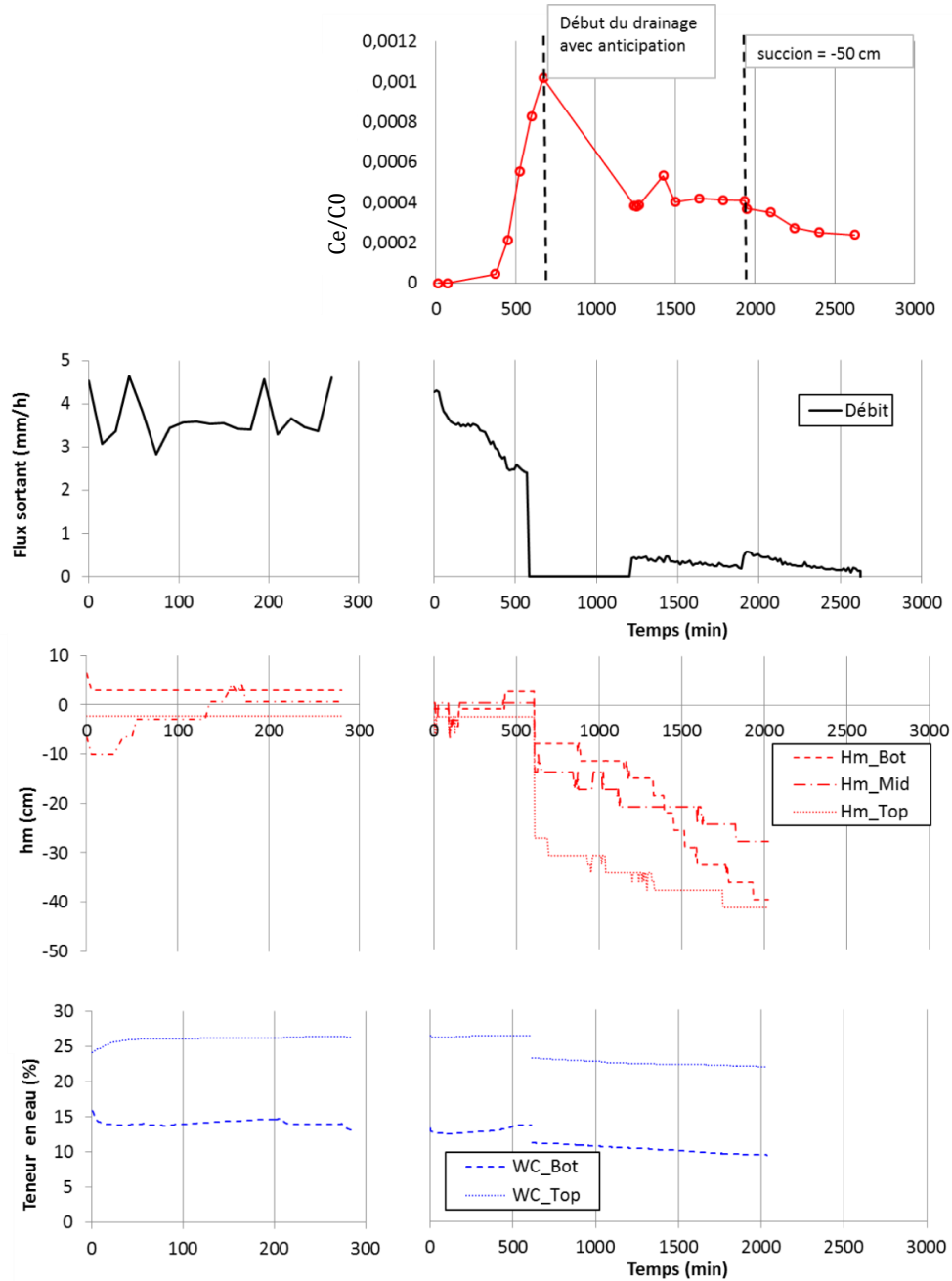


Figure 71: La courbe de percée (en haut) et le suivi du débit, de la pression matricielle et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution finale de découpe de colonne 8.

3.3.1.2.2 Suivi instrumental

Le Tableau 15 présente les estimations de la teneur en eau pour chacune des deux phases de drainage (-25 cm et -50 cm). Les erreurs sont plus importantes que pour la colonne 6 (presque 2 %). Durant cette expérience, le collecteur de fraction s'est arrêté à cause d'une panne de courant. Le volume d'eau sortie de la colonne durant cette phase est donc mal estimé et peut expliquer l'erreur plus élevée (2 %) observée pendant cette phase. Les sondes décrivent correctement les teneurs en eau à l'intérieur de la colonne. La sonde de teneur en eau 'Bot' a indiqué des teneurs en eau très faibles durant l'ensemble des expériences. Cette sonde semble donc être fonctionnelle cependant, mais doit sans doute être insérée dans un faciès très particulier de la colonne.

Tableau 15: Estimation de la validité des mesures des teneurs en eau réalisées par les sondes par suivi du débit et par séchage de la colonne 8.

	Volume d'eau	$\Delta\theta$	$\theta_{\text{moy}} \text{ mesurée}$ (capteurs)	$\theta_{\text{moy}} \text{ réelle}$	Erreur
	(ml)	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)	(cm ³ .cm ⁻³)
Final (-50 cm)	107,58	0,0114	0,154	0,141*	+ 0,013
- 25 cm	541,91	0,0579	0,1602	0,152**	+ 0,008
Avant drainage (4mm/h)			0,199	0,209**	- 0,010

*teneur en eau obtenue par séchage de la colonne, **teneur en eau obtenue par séchage + teneur en eau drainée

3.3.1.3 Cartographie du Bleu Brillant

3.3.1.3.1 Colonne 6

Au moment de la découpe, trois lithologies ont été mises en évidence sur le pourtour et à l'intérieur de la colonne : la lithologie « calcaire ocre fin », de texture relativement grossière et de couleur ocre, la lithologie « calcaire blanc fin » d'aspect plus fin que la lithologie décrite précédemment est blanche, et la lithologie « farine blanche », aux aspect très blanc, fine et pulvérulente. Les

lithologies observées sont très proches de celles décrites dans la notice géologique pour la description de la formation du calcaire de Morancez présent sur le site d'étude (Figure 9C) (§2.1.2.2).

La Figure 72 montre le résultat de la mosaïque de 176 macrophotographies. Nous constatons que l'ensemble de la colonne n'est pas teintée de bleu après 20 h d'infiltration puis 24 h de drainage. Aucune statistique n'a été réalisée, mais il semble que seulement la moitié de la périphérie soit teintée et ait donc participé à l'écoulement. Ce résultat montre également que l'eau circule à l'intérieur de la colonne et n'emprunte pas les parois de la colonne, l'effet de bord peut donc être considéré comme négligeable.

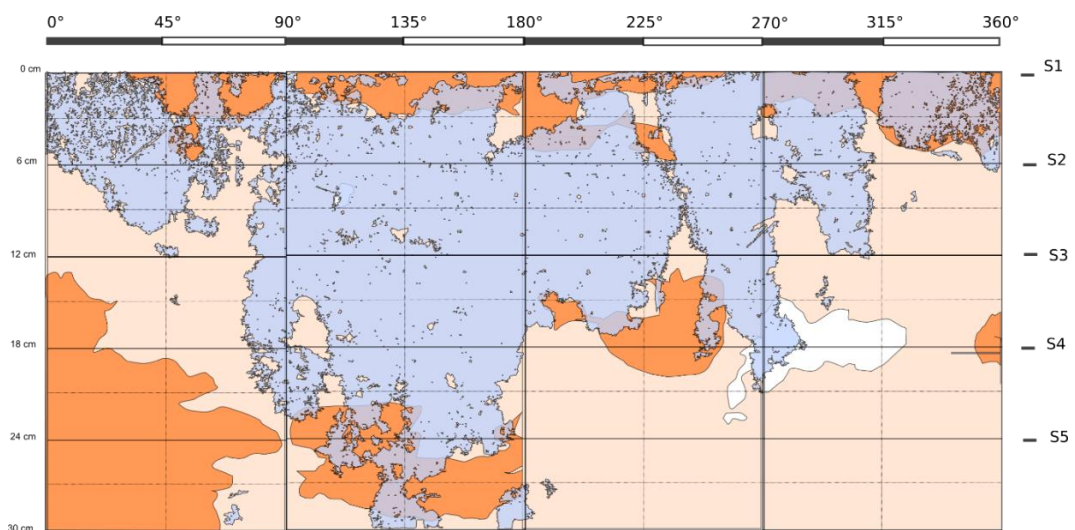
Le résultat de la cartographie semi-automatique du BB (Figure 73) est proche et cohérente avec la photographie (Figure 72). Le procédé semble donc robuste. Lors de la découpe (Figure 74), on observe que quelques éléments grossiers sont présents à la surface de la colonne (Figure 74, S1), le reste semble assez homogène et principalement rempli de calcaire blanc fin (S2 S3). Le calcaire ocre fin apparaît au niveau des sections S4 et S5. La cartographie du BB dans les sections montre que la BB n'emprunte pas toute la section de la colonne. Le BB est présent dans l'ensemble de la couche S2 et S3, un peu moins sur la couche S1. En revanche, les sections S4 et S5 ne sont pas entièrement teintées. Sur ces dernières sections, le BB se trouve à l'intérieur de la colonne ce qui est cohérent avec la cartographie du BB du pourtour de la colonne (Figure 73), et correspond bien à la profondeur de disparition du BB.

Sur S1, le BB semble se trouver davantage dans le calcaire ocre fin au détriment du calcaire blanc fin. Pour la S2 et S3, le BB est réparti de façon homogène sur toute la section. Puis une hétérogénéité de la répartition du BB apparaît pour S4, qui semble fortement marquée par la présence d'une hétérogénéité des lithologies.

La superposition de la lithologie et de la cartographie du BB dans les sections et sur le pourtour de la colonne montre que le bleu est plus présent dans la lithologie calcaire blanc fin.



Figure 72: Mosaïque d'image des 176 macrophotographies pour la colonne 6



Légende:

- Calcaire ocre fin
- Calcaire blanc fin
- Farine Blanche

Figure 73 : Cartographie du Bleu Brillant sur le pourtour de la colonne 6 avant le protocole de découpe

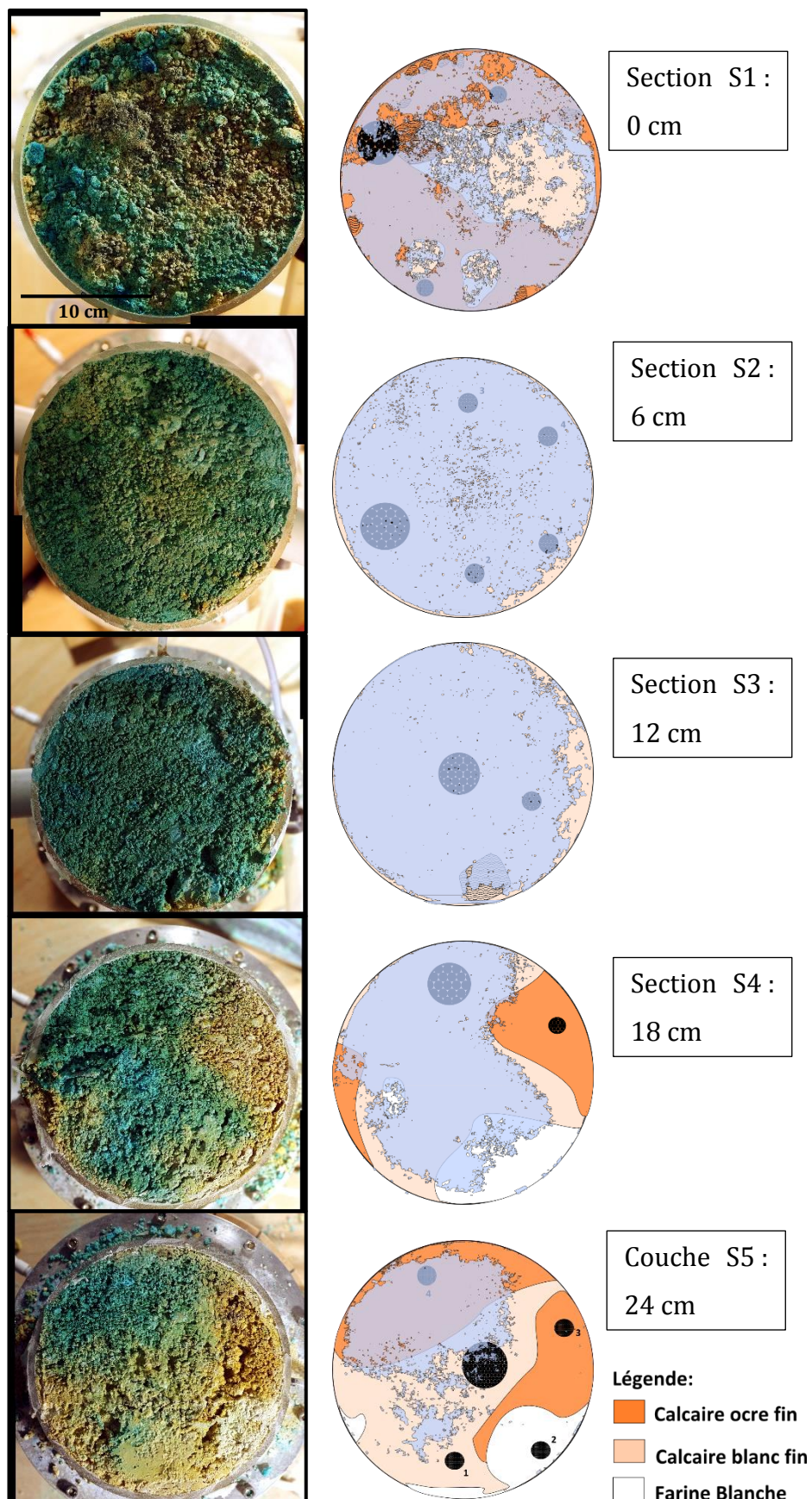


Figure 74: Photographie et cartographie du bleu brillant et description lithologique pour la colonne 6

3.3.1.3.2 Colonne 8

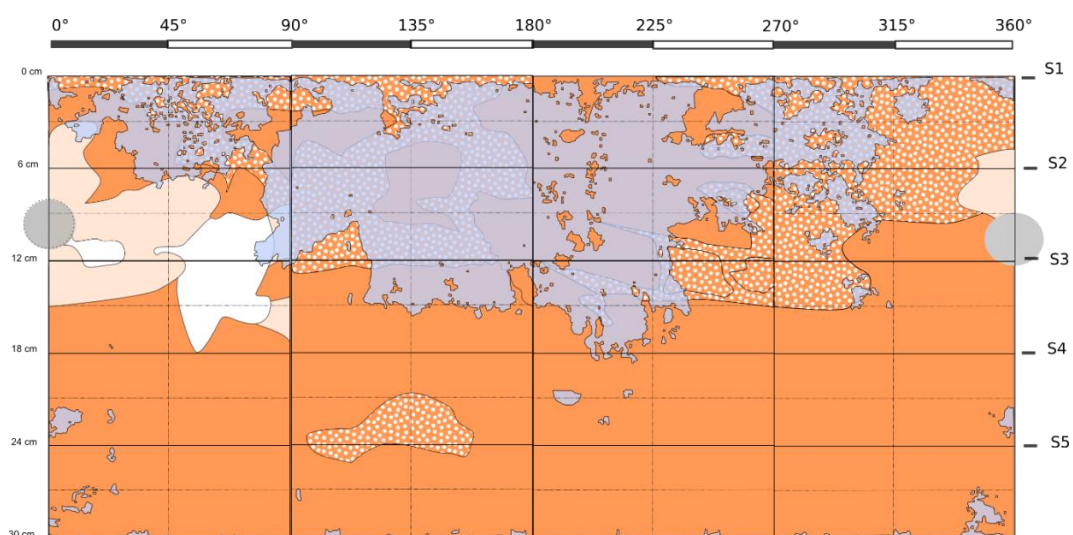
Après 10h d'infiltration et 24 h de drainage le BB ne teinte pas l'ensemble de la périphérie de la colonne 8 (Figure 75), comme observé pour la colonne 6 (Figure 72). Cette expérience a souffert d'une coupure d'électricité au cours de la phase d'infiltration, les états hydriques des deux colonnes au moment de la photographie ne sont pas identiques et ne peuvent pas être comparés. Le BB est présent sur un tiers du pourtour de la colonne (Figure 76).

Dans cette colonne quatre lithologies sont présentes: la lithologie calcaire ocre grossier, les lithologies calcaire ocre fin et calcaire blanc fin, et la lithologie farine blanche. La lithologie calcaire ocre grossier est remplie d'éléments centimétriques avec une matrice sableuse de type calcaire ocre fin. Le calcaire ocre grossier est présent en grande majorité dans la partie supérieure de la colonne. La Figure 76 montre que le BB est principalement présent dans la lithologie ocre grossier. La description de lithologies des sections (Figure 77) montre que la lithologie ocre grossière reste présente dans la colonne même après 15 cm de profondeur, contrairement à ce qui est décrit sur le pourtour de la colonne (Figure 76).

La cartographie du BB dans les sections montre que le BB n'emprunte pas tout le volume de la colonne (Figure 77). Le BB est présent dans presque l'ensemble des sections S1, S2 et S3. Dans ces couches, on observe un contraste important dans la répartition du BB, qui est moins présent dans le calcaire blanc fin. En revanche, les couches S4 et S5 ne sont presque pas teintées. Sur ces dernières sections, le BB se trouve à l'intérieur de la colonne ce qui est cohérent avec la cartographie du BB du pourtour de la colonne, et correspond bien à la profondeur de disparition du BB.



Figure 75: Mosaïque d'image des 176 macrophotographies pour la colonne 8



Légende:

-  Calcaire ocre grossier
-  Calcaire ocre fin
-  Calcaire blanc fin
-  Farine Blanche

Figure 76 : Cartographie du bleu Brillant sur le pourtour de la colonne 8 avant le protocole de découpe

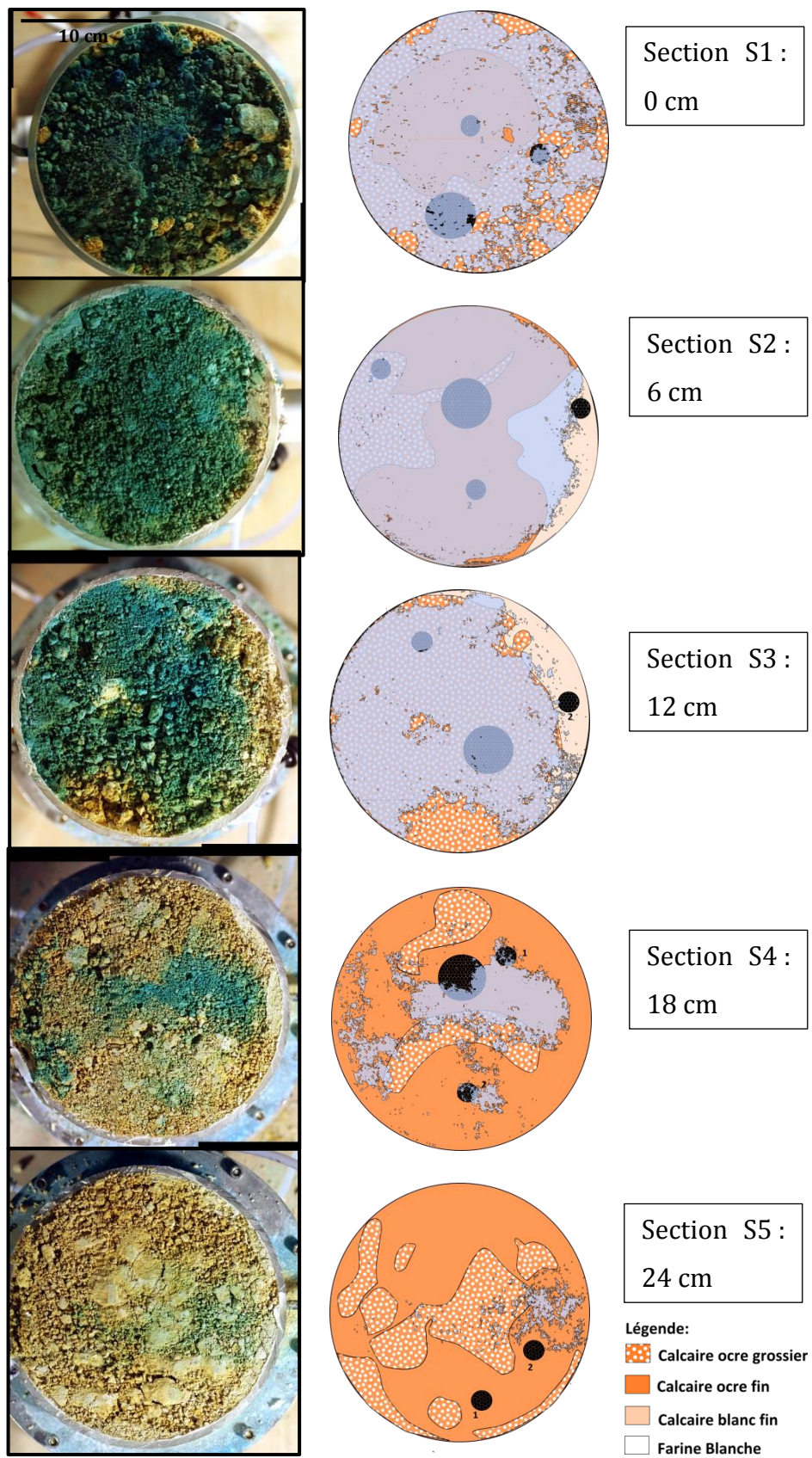


Figure 77: Photographie et cartographie du Bleu brillant ainsi que la description lithologique pour la colonne 8

3.3.1.4 Caractérisation des lithologies

3.3.1.4.1 Granulométrie

3.3.1.4.1.1 Colonne 6

La proportion de sables fins devient plus importante pour la dernière couche (24-30 cm de profondeur). Cette augmentation est due à la présence de billes de verre (50-90 μm) dans cette couche. Les proportions de chaque fraction granulométrique sont très proches pour les couches 0-6, 12-18 et 18-24 cm. Les proportions de la couche 24-30 sont également proches pour les fractions argile, limons fins et limons grossiers. La différence se situe sur la proportion de sable fins dont la proportion augmente à cause de la présence de billes de verre. La couche 6-12 cm a des proportions plus faibles de limons fins et limons grossiers. La description des lithologies (Figure 74) n'a pas identifié de particularité dans cette couche.

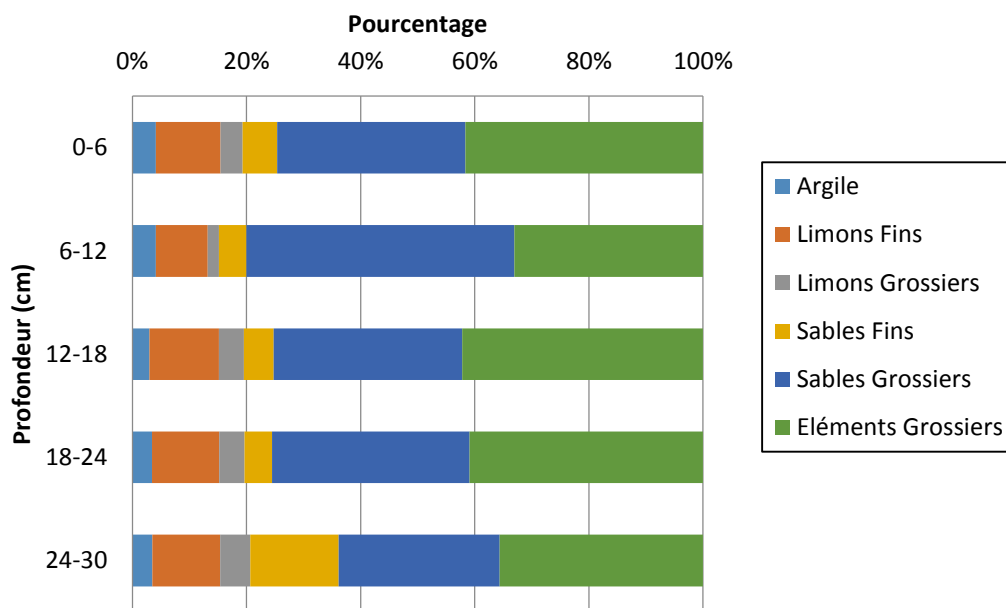


Figure 78: Granulométrie des couches de la colonne 6 au moment de la découpe de la colonne

3.3.1.4.1.2 Colonne 8

La proportion de limons fins est largement inférieure dans la colonne 8 par rapport à la colonne 6 (Figure 79). On constate que la proportion de limons fins est légèrement plus importante dans la couche 6-12 cm, ce qui

correspond à la présence des lithologies calcaire blanc fin et calcaire farine blanche dans cette couche. Lors de la découpe, le matériau semblait de plus en plus dur et rempli d'élément grossier avec la profondeur (Figure 80). Cette dynamique semble ne pas se refléter dans la granulométrie, puisque la proportion d'éléments grossiers (EG) reste stable, en revanche la proportion de sables grossiers augmente avec la profondeur. La dernière couche ne respecte pas cette dynamique, mais les proportions sont biaisées par la présence des billes de verre qui augmentent artificiellement la proportion de sables fins au détriment des autres fractions.

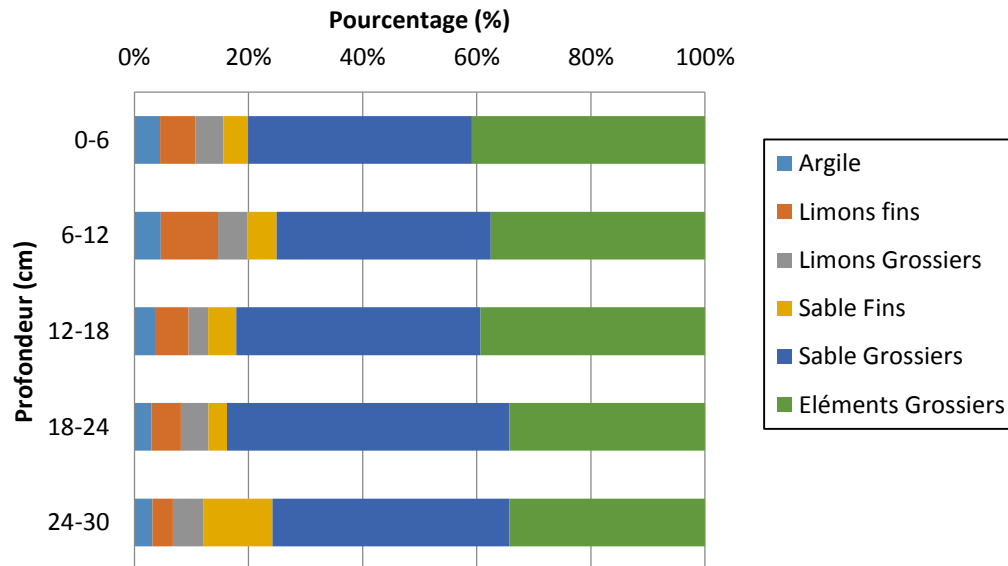


Figure 79: Granulométrie des couches de la colonne 8 au moment de la découpe de la colonne

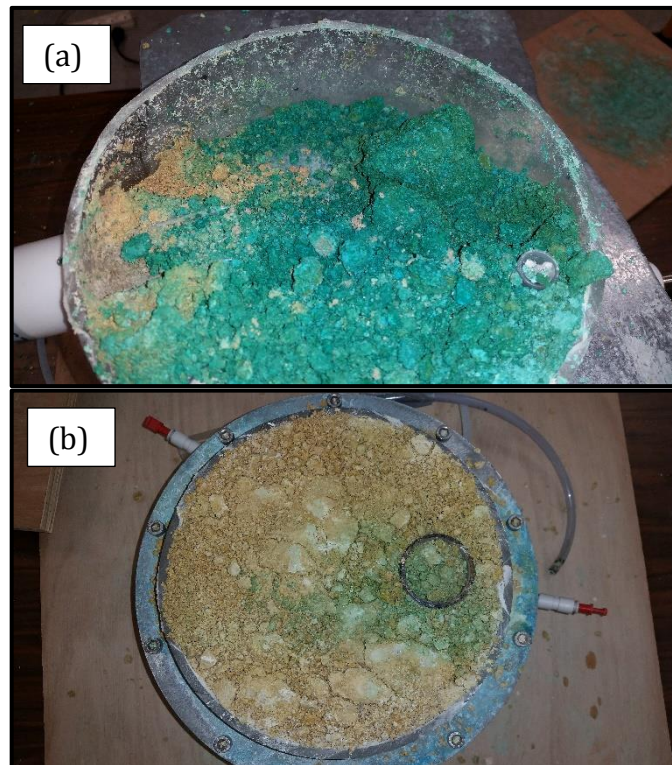


Figure 80: Photographie de la grossièreté du matériau de la colonne 8 au moment de la découpe ; (a) photographie de la surface de découpe à 6 cm de la couche (6-12 cm) ; (b) photographie de la surface de la découpe à 24 cm.

3.3.1.4.2 Distributions de taille des pores

3.3.1.4.2.1 Colonne 6

Le Tableau 16 présente les porosités obtenues au porosimètre à mercure sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs et dans les différentes lithologies observées lors de la découpe de la colonne 6 (Annexe 23). La moyenne par couche est obtenue en faisant la moyenne des porosités des lithologies présentent au sein de la couche. La porosité semble plus importante dans les deux premières couches (0-12 cm). En moyenne, la porosité est croissante du calcaire ocre fin (45 %) au calcaire farine blanche (55 %). Le calcaire de la colonne 6 est très poreux.

Tableau 16: Porosité (en %) des différentes lithologies observées dans les différentes couches de la colonne 6.

Col6	Ocre fin	Blanc fin	Farine Blanche	Vrac	Moyenne par couche
[0-6 cm]	46.82	58.75			52.78
[6-12 cm]	51.48	53.29			52.38
[12-18 cm]				44.73	44.72
[18-24 cm]	42.61				42.61
[24-30 cm]	38.73	40.42	54.57		44.57
<i>Moyenne</i>	44.91	50.82	54.57	44.72	47.93
<i>écart type</i>	5.48	9.41			6.52

3.3.1.4.2.2 Colonne 8

Le Tableau 17 présente les porosités obtenues au porosimètre à mercure sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs et dans les différentes lithologies observées lors de la découpe de la colonne 8 (Annexe 24). En moyenne, la porosité est croissante du calcaire ocre grossier (39 %) au calcaire blanc fin (60 %). La porosité du calcaire blanc fin est beaucoup plus élevée que dans la colonne 6 (+ 10 %). La couche S2 (6-12 cm) a une porosité très importante, due à la présence du calcaire blanc fin très poreux. Ce qui coïncide avec la présence d'une proportion importante de limons fins au sein de la couche dans l'étude granulométrique (Figure 79) et de la présence de calcaire blanc fin lors de la description lithologique (Figure 77).

Tableau 17: Porosité de la colonne 8 sur les 5 couches pour différentes lithologies présentes dans la couche.

Col8	Ocre grossier	Ocre fin	Blanc fin	Moyenne par couche
[0-6 cm]	30.80	50.86		40.83
[6-12 cm]	44.52	54.68	60.37	53.19
[12-18 cm]	40.17	54.50		47.33
[18-24 cm]	38.835			38.83
[24-30 cm]	42.54			42.54
<i>Moyenne</i>	39.37	53.34	60.37	46.36
<i>écart type</i>	5.26	2.15		8.86

3.3.1.4.3 Description des pores

3.3.1.4.3.1 Colonne 6

L'analyse au micro-tomographe des micro-colonnes issues de la colonne 6 montre que la matrice calcaire se compose de grains de diamètre millimétrique, avec la présence entre ces grains d'éléments très fins (Figure 81). Les échantillons avec une proportion importante de ces éléments fins entre les grains ont été identifiés lors de la découpe comme du calcaire blanc fin. A l'inverse, les échantillons identifiés comme du calcaire ocre fin présentent une faible proportion de ces éléments fins et un espace inter-grain important.

Pour la section S1 (à 0 cm de profondeur), l'échantillon observé présente les deux types de granulométries. Il a pourtant été classifié macroscopiquement comme du calcaire ocre fin. La limite entre ces deux lithologies est très proche spatialement de l'échantillon observé (Figure 74).

3.3.1.4.3.2 Colonne 8

Pour la colonne 8, on peut observer également cette distinction (Figure 81). Pour la section S3 (12 cm de profondeur), la proportion d'éléments très fins est très importante. Pour la section S5 (à 24 cm de profondeur), on observe ces éléments fins alors que la lithologie observée est ocre fin. Néanmoins l'échantillon observé se trouve proche d'une zone atteinte par le BB (Figure 77), ce qui tend à montrer que le BB empreinte la microporosité créée par les éléments fins.

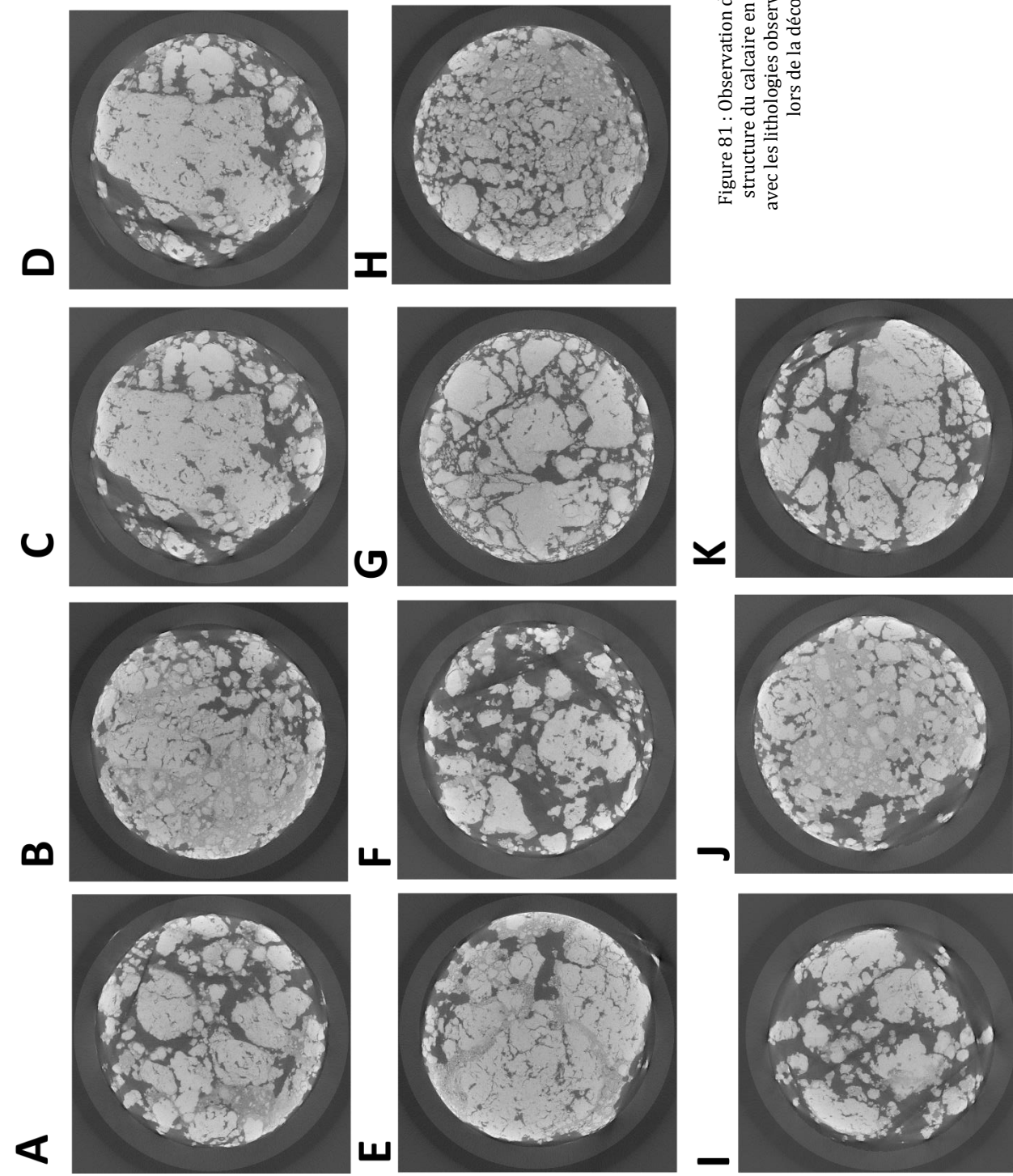
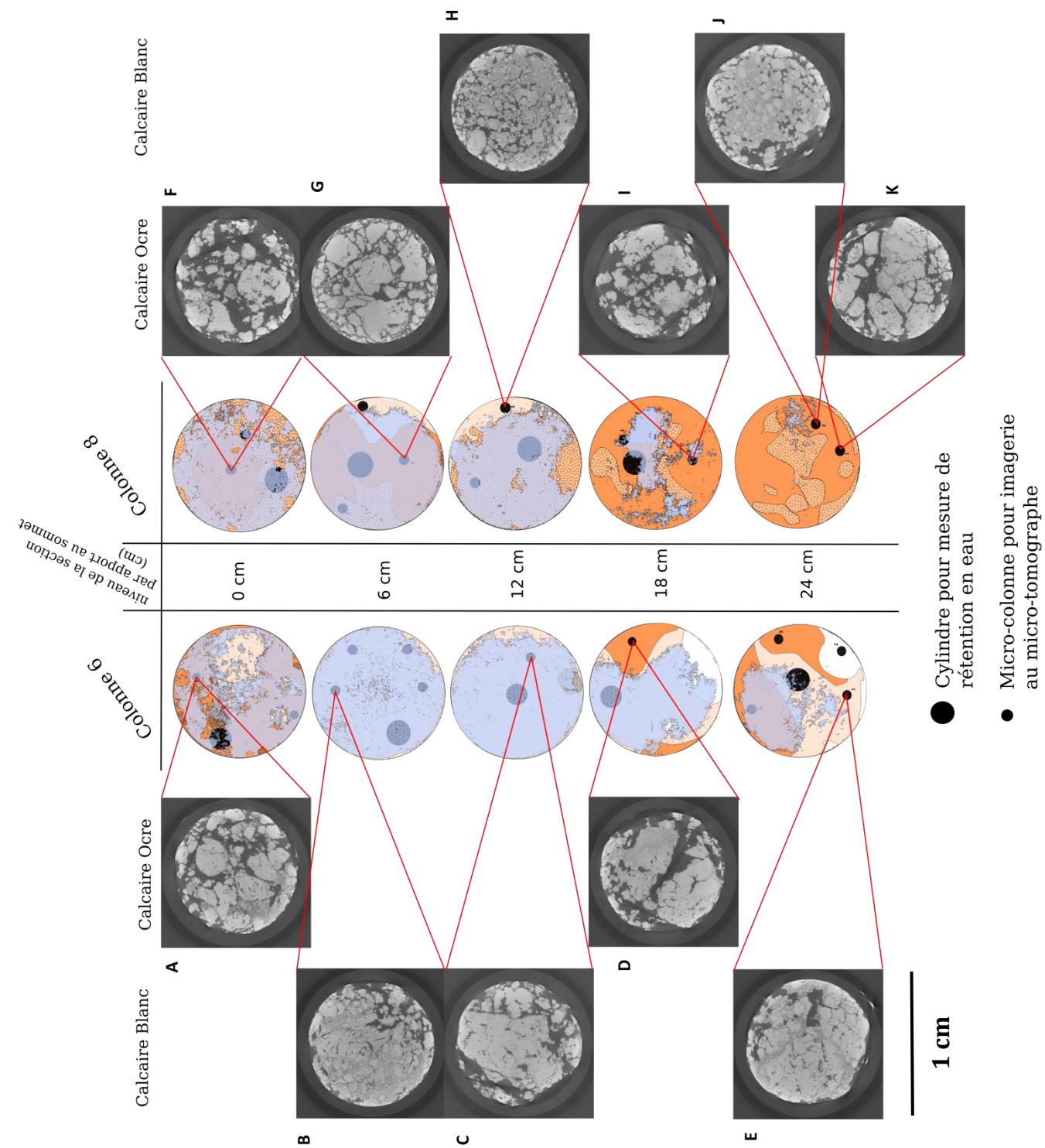


Figure 81 : Observation de la structure du calcaire en lien avec les lithologies observées lors de la découpe

3.3.2 Discussion

3.3.2.1 Impact de la lithologie sur les chemins d'écoulement

Le premier constat est que tout le volume de chaque colonne ne participe pas à l'écoulement. Après 10 ou 20 h d'infiltration du BB, aucune des deux colonnes n'est entièrement teintée. La répartition du BB au sein de la colonne montre qu'il n'y a pas d'effet de bord.

Cette étude montre que lorsque la lithologie est homogène au sein d'une ou plusieurs couches, la distribution de BB est elle aussi homogène. Ce comportement s'observe dans la colonne 6 pour les sections S2 et S3 (Figure 74). Lorsque deux ou plus de lithologies sont présentes au sein d'une même couche, la distribution du BB suit la séparation des lithologies (voir la section S4 pour la Col6, (Figure 74) et les sections S2 et S3 pour la Col8 (Figure 77)). En revanche, la distribution n'est pas toujours celle qu'on attend dans les sections S2 et S3 de la colonne 8 : le BB se trouve dans la lithologie ocre grossier, alors que dans la Colonne 6, le BB se trouve dans la lithologie blanc fin.

L'analyse de micro-colonnes au micro-tomographe montre que les lithologies se distinguent : la lithologie ocre fin se compose de grains sans matrice, alors que le calcaire blanc fin se distingue par des grains avec une matrice. Le BB semble emprunter les lithologies avec des éléments fins. La cimentation du calcaire semble jouer un rôle important dans l'écoulement.

3.3.2.2 Discretisation des lithologies

Dans chacune des colonnes, les analyses de porosimètre à mercure ont permis de distinguer les lithologies du plus grossier au plus fin. Ce n'est pas un critère pour distinguer les lithologies, puisque d'une colonne à l'autre une même valeur de porosité peut correspondre à deux lithologies différentes. Le classement de la porosité au sein d'une colonne reste relatif.

L'analyse au micro-tomographe a permis de mettre en évidence deux types de calcaire. Un calcaire avec de gros éléments sans matrice, qui correspond à

une forme de calcaire ocre fin. Et un calcaire avec de gros éléments et une matrice, qui correspond à une forme de calcaire blanc fin. Ce résultat est confirmé par la granulométrie, puisque, lorsque la matrice est présente, la proportion de limons fins augmente.

3.3.3 Synthèse

Le traçage au BB sur les colonnes, suivi de leur découpe et de leur caractérisation, a permis de mettre en relation les hétérogénéités de faciès et de porosité du matériau avec leur propriété de transport des solutés. L'estimation de la teneur en eau après la découpe a permis de valider les mesures de teneur en eau réalisées par les sondes. Au cours des expériences, certaines sondes semblaient avoir des valeurs discutables (la sonde de teneur ' θ_{bot} ' et la sonde de potentiel matriciel ' $h_{m\ mid}$ ' pour la colonne 8). Cette vérification a permis de valider les valeurs obtenues par ces sondes. A la découpe, la continuité entre toutes les sondes et le matériau de la colonne était bonne. Les valeurs de θ_{bot} et $H_{m\ mid}$ pour la colonne 8 s'expliquent par la présence de nombreux éléments grossiers dans cette couche, créant ainsi un milieu différent du reste de la colonne.

Dans les deux cas, la BB s'infiltre dans la première moitié de la colonne, dans son ensemble, puis le BB emprunte des chemins d'écoulement localisés. La caractérisation porosimétrique et granulométrique, ainsi que l'analyse au micro-tomographe, montrent que le critère principal de favorabilité des écoulements est la présence d'une matrice entre les grains.

3.4 Modélisation des courbes de percée : étude de l'influence du lit de billes de verre à la base de la colonne

3.4.1 Optimisation des paramètres

3.4.1.1 Paramètres du lit de billes de verre

3.4.1.1.1 Estimation de K_s

Le test de perméabilité à charge variable sur 6 essais a permis d'estimer le K_s d'un lit de bille de verre de 2 centimètres (Figure 82). La figure montre que,

pour tous les essais, le K_s augmente au cours de l'expérience. Cet effet est certainement dû au temps pris par les billes de verre pour se ré-humidifier. Les valeurs en fin d'expérience semblent être plus robustes que celles obtenues en début d'expérimentation. L'évolution du K_s s'atténue avec le nombre d'expériences, certainement à cause des modifications géométriques du milieu entre le premier et le dernier essai. Le K_s moyen des billes de verre estimé par cette méthode est de $0,159 \text{ cm/min}$ ($2,65 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$).

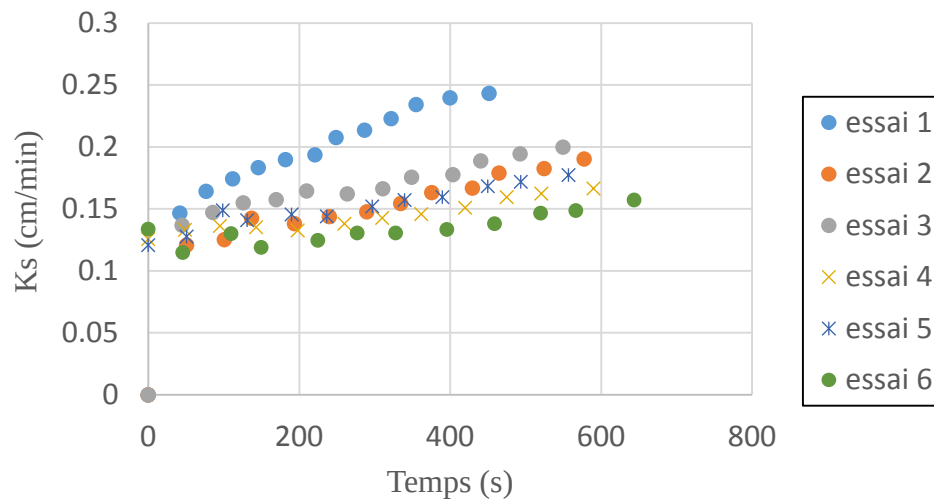


Figure 82: Estimation du K_s à partir de tests de perméabilité à charge variable.

3.4.1.1.2 Ajustement des courbes de rétention en eau

Les points de pression obtenus sur 10 cylindres remplis de billes de verre au bac à sable montrent que la réplicabilité des valeurs est bonne (Figure 83). Les ajustements sur chacun des échantillons ont été contraints avec un $\theta_{s \text{ moy}}$ de $0,471 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ obtenu expérimentalement par pesée et un θ_r fixé à $0,03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$. Deux ajustements peuvent décrire les points expérimentaux de $\theta(h)$ des billes de verres (Figure 83 ; Tableau 18).

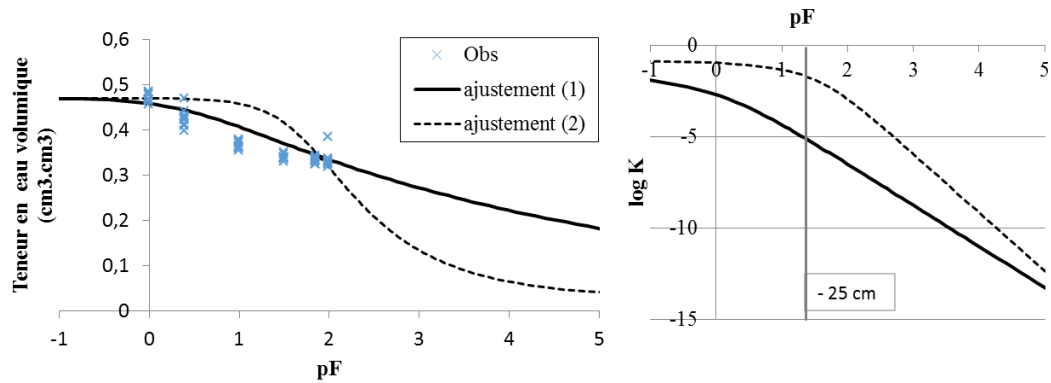


Figure 83: Courbe de rétention en eau moyenne avec l'ensemble des points de mesure pour les 10 échantillons pour chaque potentiel matriciel.

	θ_r	θ_s	α	n	K_s
	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$	min^{-1}	(-)	$\text{cm}.\text{min}^{-1}$
ajustement 1	0,03	0,471	0,4	1,1	0,159
ajustement 2	0,03	0,471	0,02	1,48	0,159

Tableau 18: Paramètres des billes de verre pour deux ajustements

3.4.1.2 Paramètres du matériau calcaire

3.4.1.2.1 Estimation de K_s

3.4.1.2.1.1 Optimisation du K_s sur les courbes $\theta(h)$ et $K(h)$

Lors de la découpe des colonnes, des cylindres ont été prélevés pour obtenir la courbe de rétention $\theta(h)$ (Figure 74 et Figure 77). Une courbe de $\theta(h)$ a été ajustée avec RETC sur chacun des 5 cylindres de la colonne 6 (Tableau 19) (Annexe 25) et sur 3 cylindres de la colonne 8 (Tableau 20) (Annexe 26). Les valeurs de α sont proches pour les deux colonnes ($0,055 \text{ min}^{-1}$, en moyenne). Le θ_r ajusté est plus important dans la colonne 8 (9 %) que pour la colonne 6 (2 %). Ces paramètres sont utilisés pour estimer le K_s des deux colonnes à partir d'un double ajustement sur RETC, à la fois sur $\theta(h)$ et sur les valeurs de $K(h)$ calculées à la profondeur 15 cm pour chaque colonne à partir des phases de drainage (§ 3.2.2.3.3) (Figure 62 et Figure 63). Chaque courbe de $\theta(h)$ est ajustée avec chaque courbe de $K(h)$ pour obtenir une gamme de variation de K_s (Tableau 21 et Tableau 22). Pour la colonne 6, le K_s moyen est de $6,2 \text{ cm/min}$ mais la courbe de $K(h)$ obtenue lors de la phase de

drainage de l'essai Col6Dr2 donne des valeurs très différentes des autres. Le Ks moyen de la colonne 6 a donc été corrigé de ces valeurs ($K_s = 0,77 (+/- 0,72)$ cm/min). Pour la colonne 8, les valeurs de Ks estimées sont cohérentes entre elles. Le Ks moyen est de $1,18 (+/- 0,91)$ cm/min.

Tableau 19: Paramètres d'ajustement de la courbe $\theta(h)$ pour les cylindres de la colonne 6

	θ_s	θ_r	α	n	R^2
	cm ³ .cm ⁻³	cm ³ .cm ⁻³	min ⁻¹	(-)	
Col6S1	0.53	0.030	0.034	3.22	0.997
Col6S2	0.45	0.023	0.049	2.86	0.999
Col6S3	0.39	0.027	0.046	2.7	0.998
Col6S4	0.38	0.034	0.059	2.58	0.994
Col6S5	0.43	0.033	0.048	2.46	0.993
moyenne	0.436	0.029	0.047	2.76	0.996

Tableau 20: Paramètres d'ajustement de la courbe $\theta(h)$ pour les cylindres de la colonne 8

	θ_s	θ_r	α	n	R^2
	cm ³ .cm ⁻³	cm ³ .cm ⁻³	min ⁻¹	(-)	
Col8S1					
Col8S2	0.40	0.088	0.054	3.94	0.998
Col8S3	0.39	0.101	0.069	2.61	0.993
Col8S4	0.51	0.084	0.041	3.54	0.996
Col8S5					
moyenne	0.433	0.091	0.055	3.36	0.996

Tableau 21: Gamme de variation de Ks (cm/min) sur le double ajustement pour la colonne 6

Col6	S1	S2	S3	S4	S5
Dr1	0.051	0.288	0.199	0.628	0.226
Dr2	4.39	28.8	15.2	50.9	13.4
Dr3	0.191	1.242	0.768	2.551	0.797
Dr4	0.162	0.998	0.649	2.117	0.701

Tableau 22: Gamme de variation de Ks (cm/min) sur le double ajustement de la colonne 8

Col8	S1	S2	S3	S4	S5
Dr1		2.43	2.07	0.211	
Dr2		0.32	1.46	0.133	
Dr3		2.55	2.09	0.214	
Dr4		1.11	1.46	0.132	

3.4.1.2.1.2 Optimisation du Ks, n et α sur la courbe de récession du débit

Une nouvelle optimisation de Ks, n et α a été réalisée sous HYDRUS-1D pour reproduire la courbe de récession du débit durant les phases de drainage (Figures 52 à 59) à partir des paramètres optimisés (Tableau 19 et Tableau 20). L'optimisation du Ks sur la courbe de récession du débit pour la colonne 6 (Tableau 23, Annexe 27) abaisse la valeur de α et augmente la valeur de n. Le Ks moyen obtenu de 0,64 cm/min est proche de la valeur moyenne estimée à partir de l'ajustement des courbes $\theta(h)$ et $K(h)$. Pour la colonne 8, l'optimisation du Ks sur la courbe de récession du débit abaisse le α et le n (Tableau 24) par rapport aux valeurs estimées précédemment. Les valeurs de Ks peuvent être élevées (4,75 cm/min), mais la moyenne reste proche de la valeur moyenne (2,0 cm/min) obtenue précédemment. Ces paramètres moyens sont utilisés par la suite pour simuler les courbes de percée (§ 3.4.2).

Tableau 23: Optimisation du Ks sur la courbe de récession du débit pour la colonne 6

Col6	α	n	Ks	R ²
Dr1	0,031	3,91	0,56	0,996
Dr2	0,035	3,29	0,89	0,894
Dr3	0,036	2,95	0,067	0,999
Dr4	0,030	3,9	1,07	0,75
<i>moyenne</i>	<i>0,033</i>	<i>3,26</i>	<i>0,64</i>	

Tableau 24: Optimisation du K_s sur la courbe de récession du débit pour la colonne 8

Col8	α	n	K_s	R^2
Dr1	0,034	2,17	2,81	0,999
Dr2	0,041	2,17	4,75	0,998
Dr3	0,055	2,00	0,21	0,999
Dr4	0,037	3,49	0,23	0,996
<i>moyenne</i>	<i>0,042</i>	<i>2,46</i>	<i>2,00</i>	

3.4.2 Variabilité des courbes de percée à faible intensité de précipitation

3.4.2.1 Prise en compte du lit de billes de verre

La Figure 84 montre l'impact de lit de billes de verre sur la courbe de percée pour l'expérience Col8PER3. Pour chaque simulation, la dispersion du lit de bille de verre est fixée à 1 cm, alors que la dispersion de la colonne est la moyenne des dispersions obtenues par les ajustements STANMOD pour l'intensité de précipitation de 4 mm/h ($\lambda = 3,93$ cm). Sans le lit de billes de verre, la courbe de percée simulée est largement surestimée. Les teneurs en eau simulées sont dans la gamme des teneurs en eau observées expérimentalement ($\theta_{top} = 0,268$ cm³.cm⁻³). En revanche, le potentiel matriciel simulé est très négatif par rapport au potentiel matriciel observé expérimentalement dans la colonne. En présence du lit de billes de verre de 2 cm d'épaisseur, avec le jeu de paramètres obtenu pour le premier ajustement ($n = 1,1$ et $\alpha = 0,4$) (Tableau 18), la courbe de percée simulée est proche de la courbe de percée obtenue expérimentalement. La prise en compte du lit de billes de verre améliore également la simulation du potentiel matriciel qui se rapproche des valeurs obtenues expérimentalement ($h_{m\ top} = - 7,16$ cm). En revanche, cette prise en compte détériore la simulation de la teneur en eau. La prise en compte du lit de billes de verre avec le second jeu de paramètres ($n = 1,48$ et $\alpha = 0,02$) ne permet pas de simuler correctement la courbe de

percée. Le potentiel matriciel simulé est loin du potentiel matriciel observé expérimentalement.

L'épaisseur du lit de billes de verre n'influence quasiment pas la forme de la courbe de percée (Annexe 29). L'ajustement 1 des billes de verre ($\alpha = 0,4$ et $n = 1,1$) est plus approprié pour expliquer les points expérimentaux.

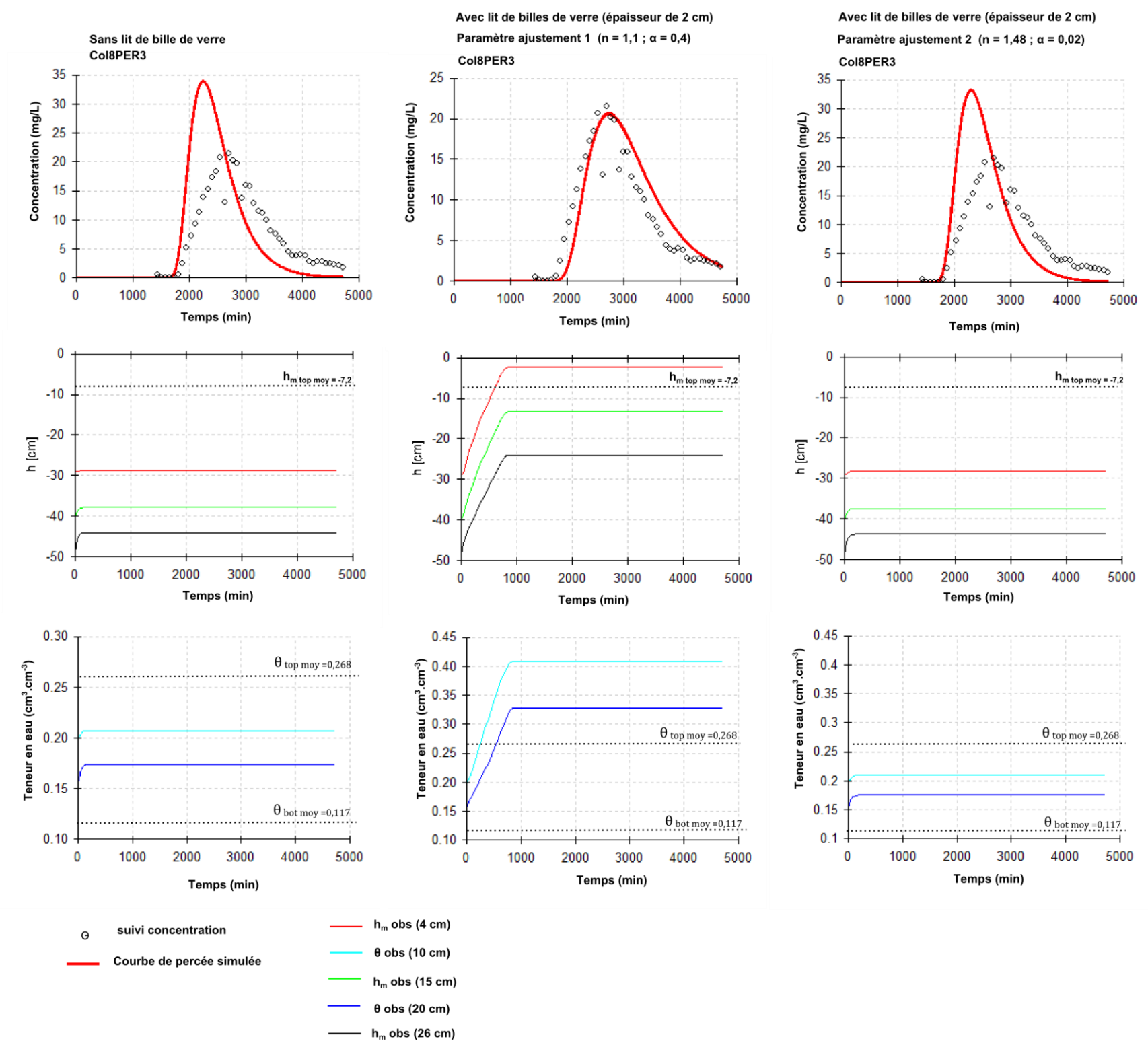


Figure 84: Influence des billes de verre sur la courbe de percée, la teneur en eau, et le potentiel matriciel, étude sur la colonne 8.

Au potentiel -25 cm imposé à la base de la colonne, les billes de verre décrites par l'ajustement 1 ont une perméabilité très faible ($3,6 \cdot 10^{-7}$ cm/min), alors que pour l'ajustement 2 les billes de verres ont une perméabilité de 0,011 cm/min (Figure 83). Dans les deux cas, les deux colonnes conduisent mieux l'eau que les billes de verre, la perméabilité de la colonne 6 à -25 cm est estimée à 0,168 cm/min, et de 0,195 cm/min pour la colonne 8. Il semble que le lit de billes de verre ait une forte influence sur la forme des courbes de percée.

La Figure 85 montre l'impact de la prise en compte des billes de verres dans la simulation de la courbe de percée. On observe que, lorsqu'aucun lit de billes de verre n'est pris en compte, la courbe de percée simulée pour un $K_{s \text{ moy}}$ (0,64 cm/min) et une dispersion moyenne (2,11 cm) est proche de la courbe observée pour le premier essai en régime permanent. Alors que lorsqu'un lit de billes de verre est pris en compte (avec les paramètres de l'ajustement 1), la courbe de percée simulée est proche de celle observée lors du troisième essai en régime permanent pour l'intensité de précipitation de 4 mm/h.

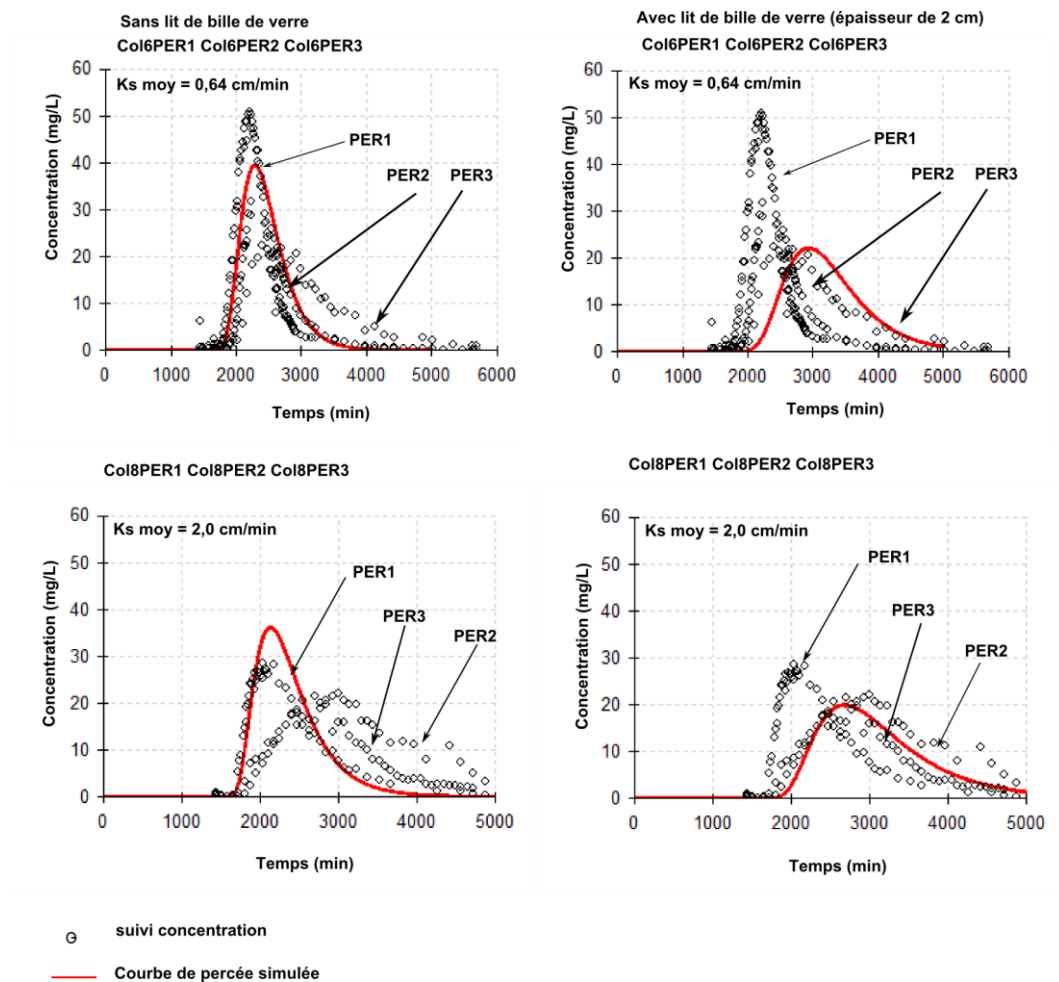
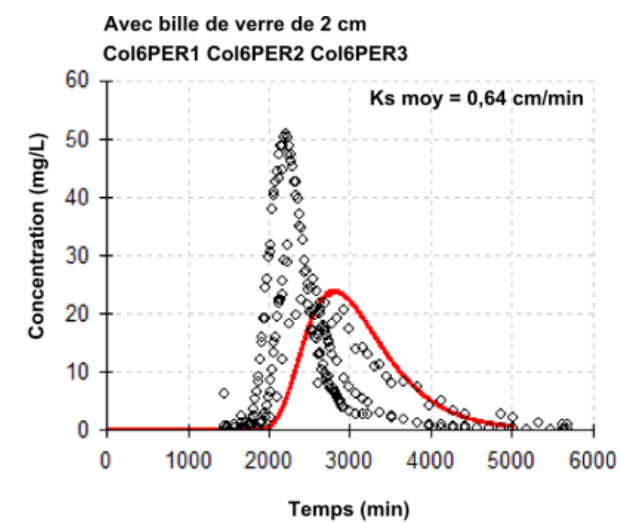
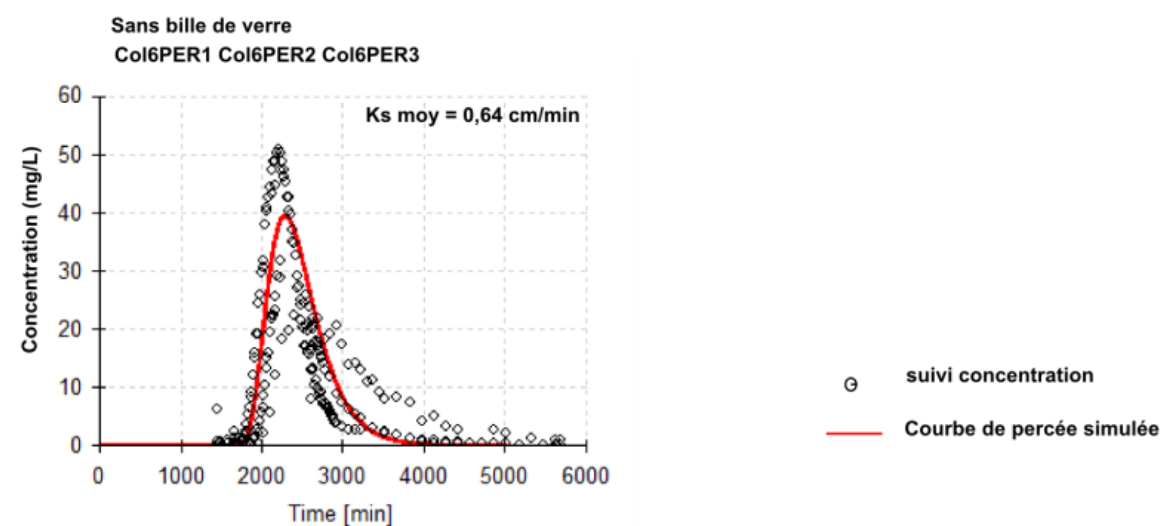


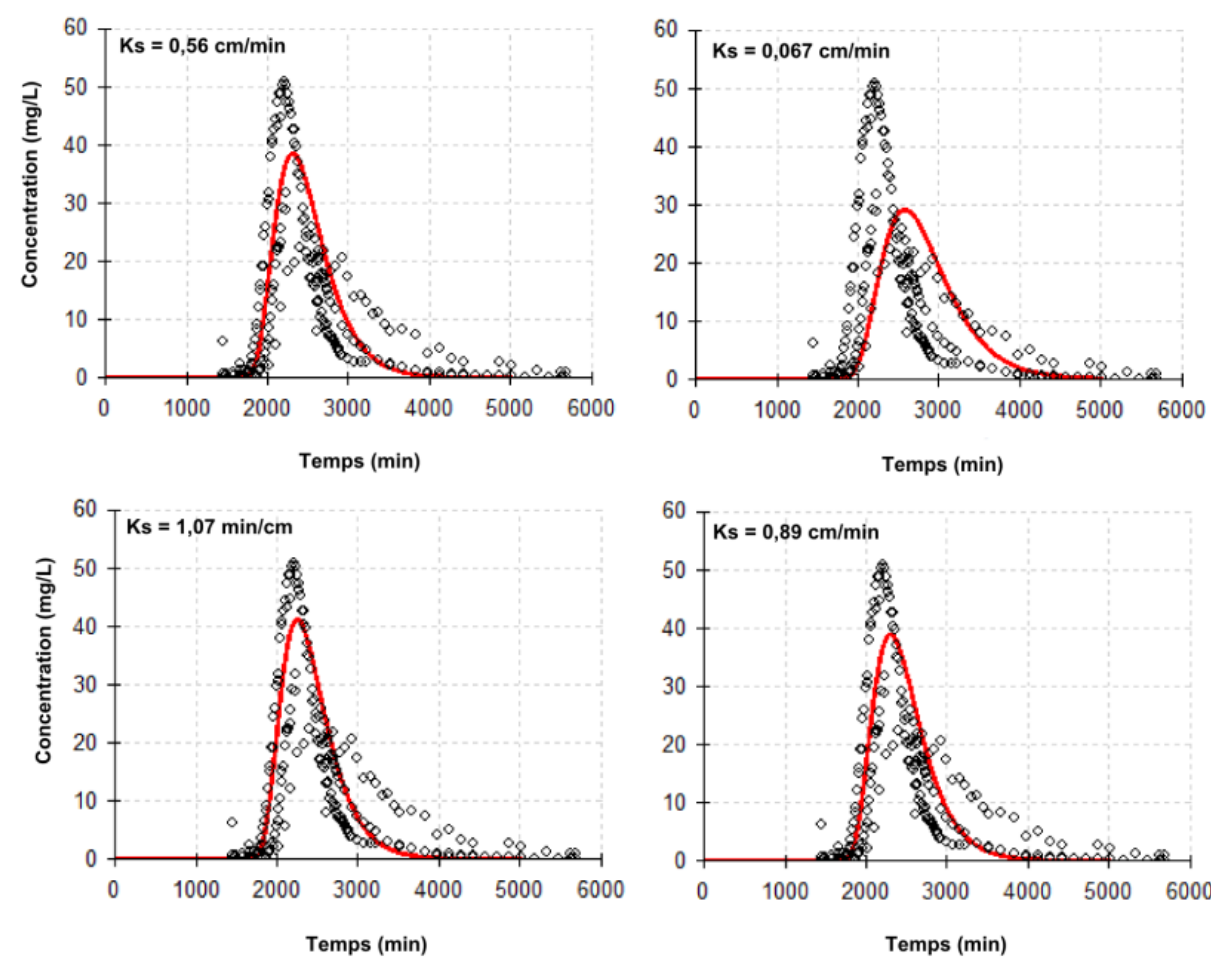
Figure 85: Impact de la prise en compte des billes de verres dans la reproductibilité des courbes de percée à faible intensité de précipitation.

3.4.2.2 Variabilité du Ks

L'optimisation du Ks sur les courbes de récession du débit a permis d'obtenir différentes valeurs de Ks. La Figure 86 montre l'ensemble des courbes de percée simulées pour les quatre valeurs de Ks obtenues pour la colonne 6 avec et sans lit de billes de verre. Est-ce que cette variabilité peut permettre d'expliquer la forme de courbe de percée à faible intensité de précipitation ? Sans lit de billes de verre, les courbes de percée simulées rendent compte de variabilités observées entre les essais. Avec un lit de billes de verre, les courbes de percée simulées varient peu. Dans ce cas, la valeur du Ks du calcaire influence peu la forme de la courbe de percée.



Variabilité du K_s sans bille de verre



Variabilité du K_s avec un lit de bille de verre de 2 cm

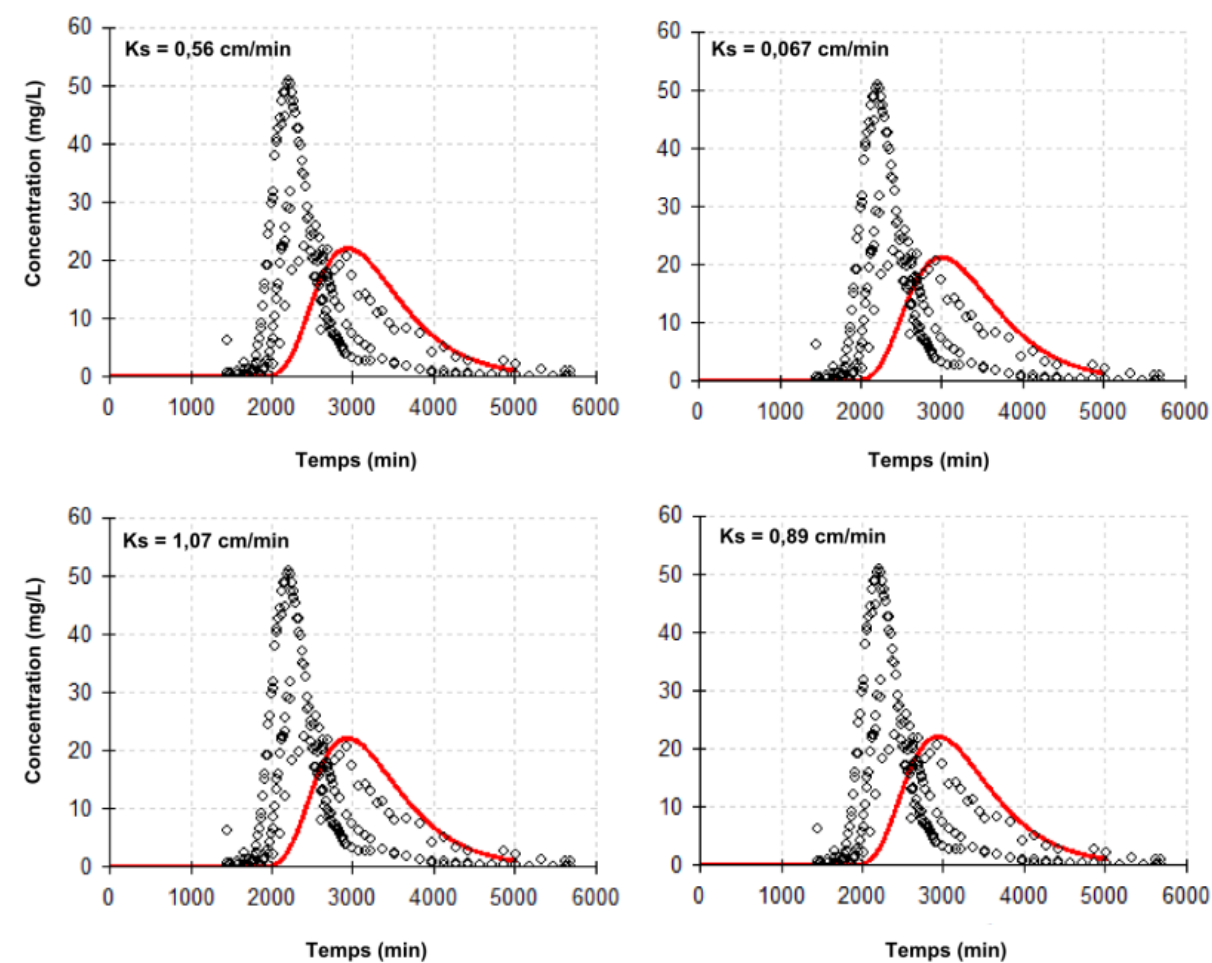


Figure 86: Variabilité du K_s pour la colonne 6 avec et sans bille de verre (paramètre d'ajustement 1).

3.4.3 Discussion

3.4.3.1 Optimisation du K_s

L'ajustement de K_s à partir de la courbe de $\theta(h)$ et des valeurs calculées de $K(h)$, d'une part, et à partir des courbes de récession des débits mesurées lors des interruptions de flux avec drainage, d'autre part, donne des valeurs moyennes très proches. La valeur moyenne de K_s obtenue pour la colonne 6 ($K_s = 0,64$ cm/min) est proche de la valeur de K_s obtenue dans la cadre du projet ESHEL sur un horizon C du site de Ouarville sur le Calcaire de Beauce ($K_s = 0,42$ cm/min). La valeur moyenne de K_s obtenue pour la colonne 8 (2,0 cm/min) est proche des valeurs obtenues par infiltrométrie à disque sur le terrain (§ 4.1.2). Néanmoins, la valeur de K_s reste très variable. En revanche, la modélisation montre que la variation de la valeur de K_s n'a pas d'influence sur la reproduction des courbes expérimentales dans le cas de la prise en compte du lit de billes de verre (Figure 86). Dans le cas contraire, seules des valeurs extrêmement faibles ($K_s = 0,067$ cm/min) permettent d'expliquer la variabilité des courbes de percée pour les faibles intensités de précipitation.

3.4.3.2 Rééquilibration des billes de verres

Au vu des modélisations faites avec HYDRUS-1D et des études du fonctionnement hydrique des colonnes, il semble que la prise en compte des billes de verre soit nécessaire pour expliquer la variabilité de la courbe de percée à faible intensité de précipitation. Deux jeux de paramètres provenant de deux ajustements de la courbe de $\theta(h)$ des billes de verre ont été testés pour voir l'impact sur la simulation des courbes de percée. L'un des jeux de paramètres n'influence pas du tout l'hydrologie de la colonne et la courbe de percée alors que le second l'impacte. Les propriétés des billes de verres peuvent avoir varié durant les premières expériences et engendré une impédance hydraulique à la base de la colonne. Ceci expliquerait la variabilité des courbes de percée sur les premières expériences en régime permanent. La prise en compte d'un lit de billes de verre, quelle que soit son épaisseur, permet d'améliorer les valeurs simulées du potentiel matriciel. En revanche,

les valeurs de teneur en eau simulées sont plus mauvaises en prenant en compte le lit de billes de verre.

Ceci peut s'expliquer par un écart important entre le θ_s estimé en laboratoire sur des cylindres non remaniés pour le calcaire (Figure 87 et Figure 88) et les θ_s réels des colonnes. Les figures présentent les valeurs de $\theta(h)$ du couple de sondes $h_{m \text{ top}}$ (6 cm) et θ_{top} (10 cm) obtenus lors des suivis expérimentaux pour chacune des deux colonnes pour chaque expérience en régime permanent.

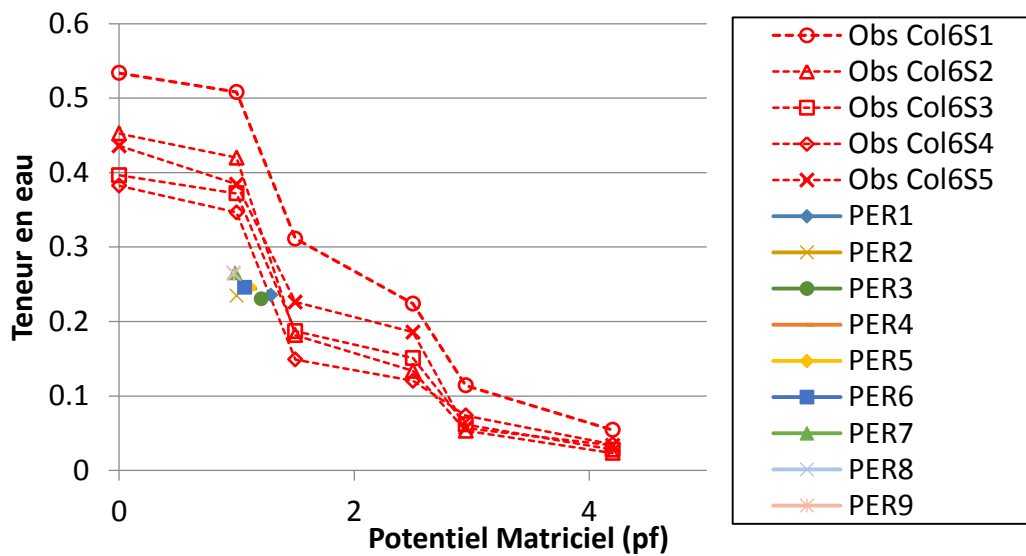


Figure 87: Points expérimentaux de courbe $\theta(h)$ pour la colonne 6 avec les couples de valeurs de teneur en eau et de potentiel matriciel pour chaque régime permanent.

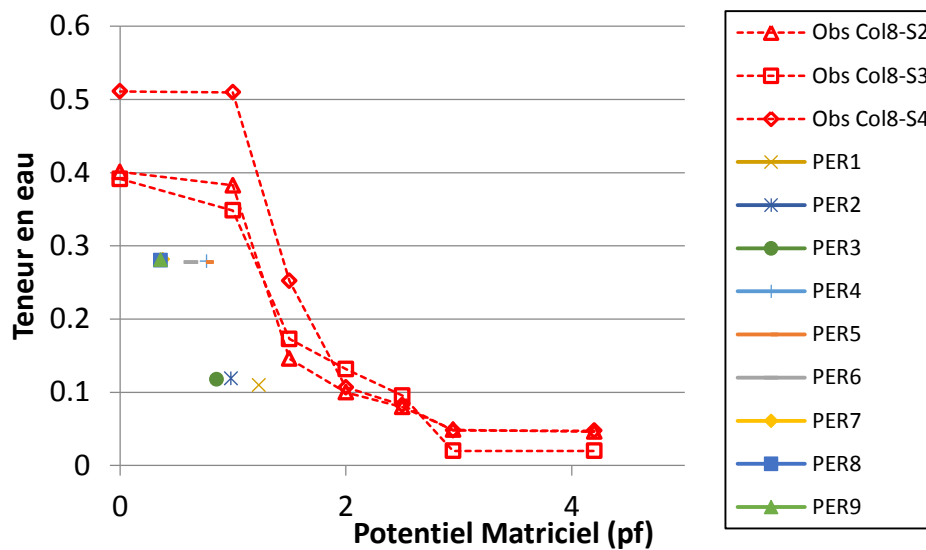


Figure 88: Points expérimentaux de courbe $\theta(h)$ pour la colonne 8 avec les couples de valeurs de teneur en eau et de potentiel matriciel pour chaque régime permanent.

Ces figures montrent un écart entre les courbes $\theta(h)$ expérimentales sur cylindres et les valeurs de couples $\theta(h)$ observées dans la colonne. Le θ_s réel semble beaucoup moins important que le θ_s estimé sur les cylindres.

Pour les billes de verre, le lit est tassé par une colonne d'environ 20 kg une fois la colonne installée. L'estimation de θ_s au laboratoire se fait sur des cylindres remplis de billes de verre sans aucun tassement.

3.4.4 Synthèse

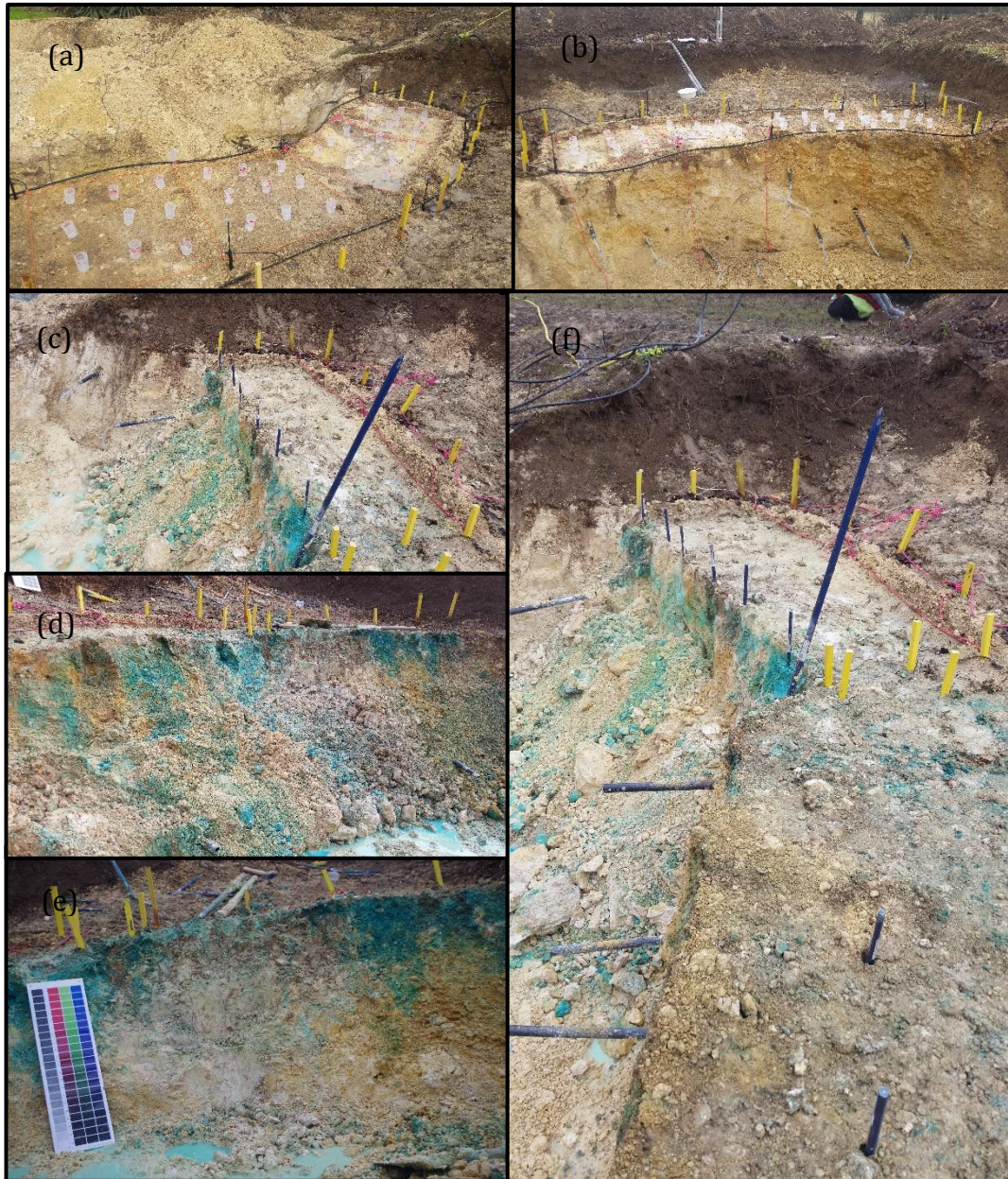
La modélisation a permis de mettre en évidence l'effet du lit de billes de verre sur la forme de courbe de percée à partir de deux ajustements RETC de la courbe de $\theta(h)$ des billes de verre. Le premier ajustement (1) permet d'améliorer la courbe de percée et la gamme de variation du potentiel matriciel dans la colonne, mais les valeurs de teneur en eau sont trop élevées par rapport aux valeurs mesurées. Le second ajustement (2) ne permet pas d'améliorer la courbe de percée : l'intégration des billes de verre n'a aucun effet sur la forme de la courbe de percée.

Avec des valeurs de vitesse et de dispersion moyenne obtenues en laboratoire la modélisation HYDRUS-1D permet d'obtenir des simulations proches des courbes de percée obtenues lors du premier essai en régime

permanent (PER1). L'intégration des billes de verre avec l'ajustement (1) permet d'obtenir une simulation proche de la courbe de percée obtenue pour le troisième essai en régime permanent. La mauvaise reproductibilité des résultats pourrait donc être due à une réorganisation ou à une évolution du degré de saturation du lit de billes de verre au cours du temps. Les tests de perméabilité sur les billes de verre ont montré une chute de la conductivité hydraulique après plusieurs essais avant d'arriver à une certaine stabilisation. Lorsqu'aucun lit de billes de verre n'est pris en compte la variabilité des K_s obtenus par optimisation permet d'expliquer une faible variabilité des courbes de percée au cours des essais.

La mauvaise simulation des teneurs en eau lors de la prise en compte des billes de verre peut s'expliquer par une mauvaise estimation de θ_s . Puisque les billes de verre utilisées pour obtenir la courbe $\theta(h)$ n'ont pas subi la compaction du poids de la colonne, la courbe obtenue au laboratoire, sans compaction, ne traduit peut-être pas bien les propriétés réelles du lit de billes de verre dans la colonne.

4 Chapitre 4 : Résultats des expériences sur le terrain



(a) et (b): étude de l'homogénéité de l'arrosage ; (c) (d) (e) et (f) : phase de découpe de la fosse du lycée de la Saussaye (CHARTRES).

4.1 Description de la fosse

4.1.1 Observations lithologiques

Lors de la description des profils sur le terrain, 7 lithologies ont été identifiées sur des critères de couleur et d'aspect (Figure 89).

La première lithologie rencontrée est le sol (Figure 89(1-2)) : c'est une lithologie de surface formant localement des poches d'intrusion dans le calcaire sous-jacent. Cette lithologie disparaît en profondeur au-delà de 30 cm depuis le sommet de la fosse. Ensuite, trois lithologies majeures sont visibles :

- la lithologie « calcaire blanc fin » (Figure 89(7-8)) : cette lithologie est meuble avec de petits agrégats avec un aspect très blanc.
- la lithologie « calcaire ocre fin » (Figure 89 (5-6)) : cette lithologie, plus sombre, a un aspect plus grossier que la « lithologie calcaire blanc fin » ; elle se compose d'agrégats millimétriques avec une matrice fine.
- la lithologie « calcaire ocre grossier » (Figure 89(3-4)) : elle est parsemée de nombreux blocs pluri-centimétriques, correspondant à la lithologie « cailloux ocre » (Figure 89 (4)).

La préparation des profils a mis en évidence une importante poche de glaise verte (Figure 89(11-12)), comportant de nombreux restes racinaires.

La dernière lithologie est très locale et visuellement marquante, car très blanche. Il s'agit de la lithologie « calcaire farine blanche » (Figure 89 (9-10)). Cette lithologie se compose d'éléments très fins, pulvérulents, qui présentent localement une orientation parallèle à l'orientation de la structure qui les contient (Figure 89(10)).

Les parties gauche (-G) et droite (-D) de la fosse sont très différentes. A l'échelle de quelques décimètres, plusieurs lithologies sont observables à l'œil nu (Figure 89). Les profils -G et -D montrent une orientation oblique (110-120°) vers le sud-ouest des lithologies.

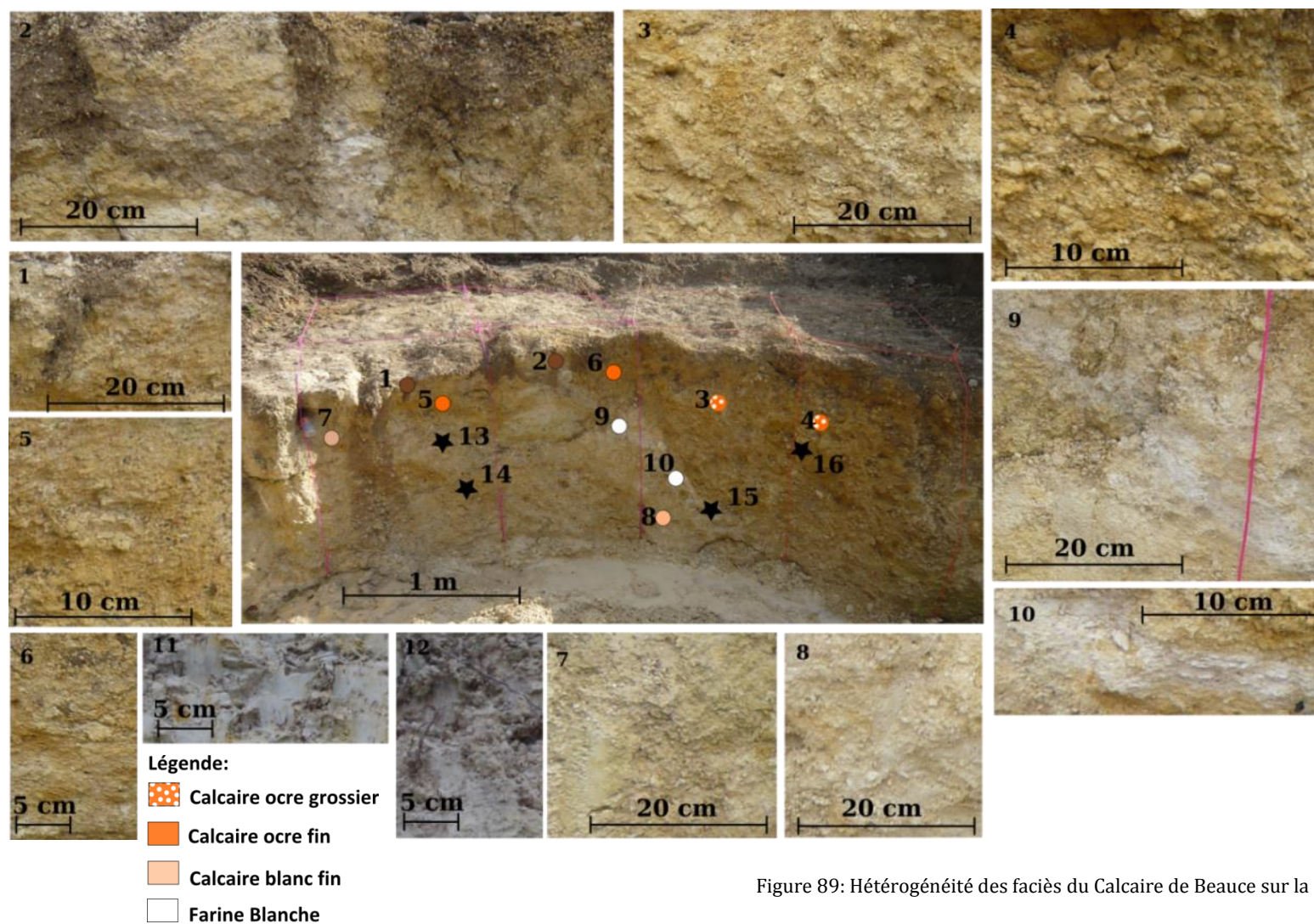


Figure 89: Hétérogénéité des faciès du Calcaire de Beauce sur la fosse étudiée

4.1.2 Caractérisation des lithologies

On observe que, pour la conductivité hydraulique au potentiel matriciel -1 cm, K_{-1} , le calcaire ocre fin est moins perméable que les autres lithologies, puis, dans l'ordre de perméabilité croissant, suivent la glaise, le calcaire ocre grossier, et le calcaire blanc fin (Tableau 25).

Les matériaux échantillonnés sont tous calcaires, avec un taux de CaCO_3 variant de 54 % à 79 %. Les teneurs en carbone organique C_{org} sont faibles, avec une moyenne de 0,37 %. Du point de vue de la composition des fines (< 2 mm), les lithologies ocre fin et blanc fin se différencient par le taux de sable grossier, la lithologie ocre fin ayant un taux de sable grossier qui dépasse les 30 %. Les lithologies blanc fin et farine blanche sont constitutionnellement proches, mais le taux d'argile atteint les 10 % dans la lithologie farine blanche, donc celle-ci est plus fine. La lithologie ocre grossier présente une part importante de sables grossiers et d'argile.

Les lithologies les plus fines, farine blanche et blanc fin, ont des porosités très importantes respectivement 65,0 %, et 59,6 %. L'ocre fin a une porosité de 46,6 % et l'ocre grossier a une porosité de 33,18 %.

La distribution des diamètres des pores (Figure 90) pour chaque lithologie montre une bonne reproduction de la courbe de distribution. La distribution est différente pour chaque lithologie. Le calcaire ocre grossier se caractérise par un mode avec un diamètre moyen autour de 1 μm . Le calcaire ocre fin se caractérise par un mode avec un diamètre moyen autour de 0,25 μm . Le calcaire blanc fin se caractérise par un mode avec un diamètre moyen de 0,55 μm . Le calcaire farine blanche se distingue des autres lithologies, car il se caractérise par deux modes distincts, un mode principal à 0,75 μm et un mode secondaire à 0,1 μm .

Tableau 25: Caractérisation des lithologies au moyen de l'infiltrométrie à disque, du porosimètre à mercure, de l'analyse granulométrique et de l'analyse du BB

	Calcaire Ocre Fin	Calcaire Blanc Fin	Calcaire Ocre Grossier	Glaise	Calcaire Farine blanche
estimation de la conductivité hydraulique					
K₋₁ (cm/min)	0,28 *	0,82 *	1,2	0,56	-
θ (cm³/cm³)	0,11	0,22	0,05	-	0,23
λ (cm)	4,9**	5,4**	3,1**	-	-
Granulométrie (< 2 mm) après décarbonatation					
Argile (%)	2,3	1,8	8,8	-	10,3
Limon Fin (%)	1,1	0,9	2,0	-	1,2
Limon Grossier (%)	5,0	16,2	3,1	-	13,2
Sable Fin (%)	4,8	1,8	3,5	-	1,7
Sable Grossier (%)	31,6	0,5	18,4	-	1,1
CaCO₃ (%)	54,5	78,2	63,6	-	71,8
C_{org} (%)	0,35	0,37	0,38	-	0,40
Porosité (%)	46,6*	59,6*	33,18*	-	65,0

* moyenne sur trois valeurs, "-" matériau non accessible,

** estimation à partir de l'analyse au BB

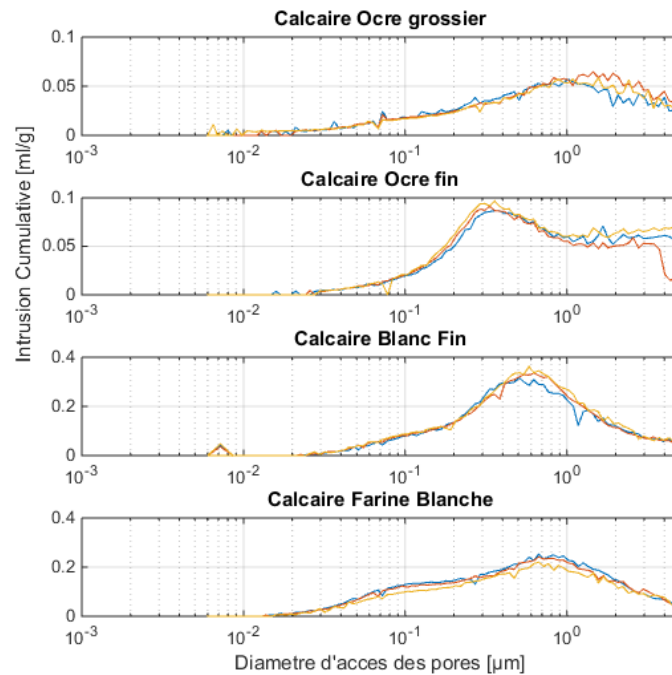


Figure 90: Courbe de distribution des pores obtenus par analyse au porosimètre à mercure.

4.1.3 Discussion

4.1.3.1 Du terrain vers la carte géologique

Au début de cette étude, un doute pouvait être émis qu'en à l'étage stratigraphique dans lequel se trouvait le site d'étude (§2.1.2.2) (Figure 9). La description approfondie des lithologies et des structures de la fosse permet de se situer dans le log stratigraphique (§2.1.2.2) (Figure 12). Les lithologies sont de couleurs blanc à ocre, ce qui pouvait correspondre à la description de l'étage « e₅ » ou de l'étage « m_{1a1} ». En revanche, un taux de CaCO₃ entre 55-80 % mesuré sur les prélèvements de la fosse (Tableau 25) correspond davantage à l'étage du « m_{1a1} ». De plus, il est décrit dans la notice géologique (Feuille VOVES N°291) que cette formation est inclinée vers le sud-ouest, ce qui correspond à l'inclinaison observée sur la fosse. Toujours dans la notice, cette formation est composée de calcaires durs et de marnes friables blanches, ces différents faciès peuvent être observés à l'échelle de la fosse. Les différents faciès locaux observés sur le terrain et dans les colonnes ont pour origine un faciès latéral du Calcaire de Beauce.

4.1.3.2 Du terrain vers les colonnes en laboratoire

Les lithologies observées sur la fosse sont cohérentes avec les lithologies observées dans les colonnes du point de vue de la couleur. Que ce soit sur le terrain ou dans les colonnes on retrouve un classement relatif selon la porosité (du moins poreux au plus poreux, ocre grossier, ocre fin, blanc fin, et farine blanche). La porosité du calcaire ocre grossier mesurée sur des échantillons de terrain donne une valeur moyenne de 33,18 % (Tableau 25) alors que les échantillons issus de la colonne 8 donne une porosité moyenne de 39,37 (+/- 5,26) % (Tableau 17). Les valeurs obtenues sur le terrain sont dans l'écart type de celles obtenues en laboratoire. Il en va de même pour les autres faciès observés : 59,6 % pour le calcaire blanc fin mesuré à partir d'un échantillon de terrain, pour 60,37 % pour la colonne 8 (Tableau 17) et 50,82 (+/- 9,41) % pour la colonne 6 (Tableau 16) ; 46,6 % pour le calcaire ocre fin mesuré à partir d'échantillons de terrain, pour 44,91 (+/- 5,48) % pour la colonne 6. Il est donc possible de faire correspondre les lithologies présentes

sur le terrain et dans les colonnes à partir des paramètres de couleur et de porosité.

De plus, les données de K_1 obtenues par infiltrométrie à disque sur le sommet de la fosse donnent des valeurs cohérentes avec les valeurs de K_s optimisées sur les colonnes. Le K_s moyen obtenu pour la colonne 8 à la fin de l'optimisation (Tableau 24) est de 2,0 cm/min. Dans l'hypothèse où l'on assimile la colonne 8 à du calcaire ocre grossier, le K_1 obtenu sur le terrain pour un faciès équivalent est de 1,2 cm/min (Tableau 25). De la même manière, pour la colonne 6, le K_s moyen obtenu à la fin de l'optimisation est de 0,64 cm/min (Tableau 24). La colonne 6 est un mélange de calcaire de faciès ocre fin et blanc fin, respectivement 0,28 et 0,82 cm/min, ce qui est cohérent avec la valeur moyenne de K_s obtenue.

4.1.4 Synthèse

La description des lithologies et des structures présentent dans la fosse a permis d'identifier l'étage stratigraphique des prélèvements des colonnes et de la fosse. Le taux de calcite (entre 55-80 %), l'inclinaison (110-120°SO) et la couleur du calcaire (blanc à ocre) désignent la formation « m_{1a1} », un faciès latéral des Calcaires de Beauce composé de calcaire dur et marne friable blanche. Les différentes lithologies observées sur la fosse sont issues de condition de précipitation latérale différente. La carte géologique est donc un bon indicateur de la nature de la ZNS en Centre – Val de Loire.

Les faciès observés sur le terrain sont cohérents avec ceux retrouvés dans les colonnes du point de vue de la couleur et des valeurs de porosités. Les valeurs de K_s optimisées sont cohérentes avec les valeurs de K_1 obtenues sur le terrain à l'aide d'infiltromètre à disque.

Les valeurs de transport obtenues expérimentalement en laboratoire reflètent le comportement des deux faciès majeurs de cet étage stratigraphique. La colonne 8 reflète le comportement vis-à-vis du transport dans le calcaire dur du miocène. La colonne 6 reflète les marnes friables blanches du miocène. Dans la notice géologique, le calcaire dur à une

composition proche des formations des Calcaires de Beauce et les marnes friables blanches ont une composition proche des formations du Lutétien (Calcaire de Morancez). Le comportement décrit par les colonnes vis-à-vis du transport peut donc être utilisé pour décrire ou modéliser le transport des solutés dans une gamme importante du log stratigraphique des Calcaires de Beauce.

4.2 Traçage à l'ion bromure

Un premier traçage à l'ion bromure a été réalisé sur la fosse du site de la Saussaye. Cette expérience est destinée à valider les valeurs de vitesse obtenues en laboratoire. Les bougies poreuses sont disposées tous les 30 cm de profondeur pour permettre une meilleure comparaison entre le terrain et le laboratoire (hauteur des colonnes de laboratoire : 30 cm)

4.2.1 Restitution de l'ion bromure

4.2.1.1 Partie gauche de la fosse

Pour la partie gauche de la fosse, l'ensemble des bougies a permis de recueillir de la solution, la concentration en bromure a donc pu être suivie à toutes les profondeurs (30, 60, 90, 120 cm, depuis le niveau de la surface d'injection) (Figure 91).

La courbe de restitution de la bougie V1B a un pic étroit avec une asymétrie. Le taux de restitution calculé est faible : 0,144 %.

La courbe de restitution de la bougie V2B montre que la restitution de l'ion bromure n'est pas achevée à la fin de l'expérience. En revanche, on observe que la phase ascendante de la courbe est décalée par rapport à celle de la courbe V1B. Le taux de restitution calculé est très faible : 0,001 %.

La courbe de restitution de la bougie V3B a un pic étroit et quasiment symétrique. La phase ascendante de cette courbe est décalée par rapport à la phase ascendante de la courbe V2B. Le taux de restitution calculé est faible : 0,019 %.

La courbe de restitution de la bougie V4B a un pic étroit avec une queue d'élution prononcée. La phase ascendante de cette courbe devance l'ensemble des phases ascendantes des courbes V1B, V2B, V3B. La bougie V4B se trouve pourtant à la position la plus profonde (120 cm). Le taux de restitution est faible : 0,089%.

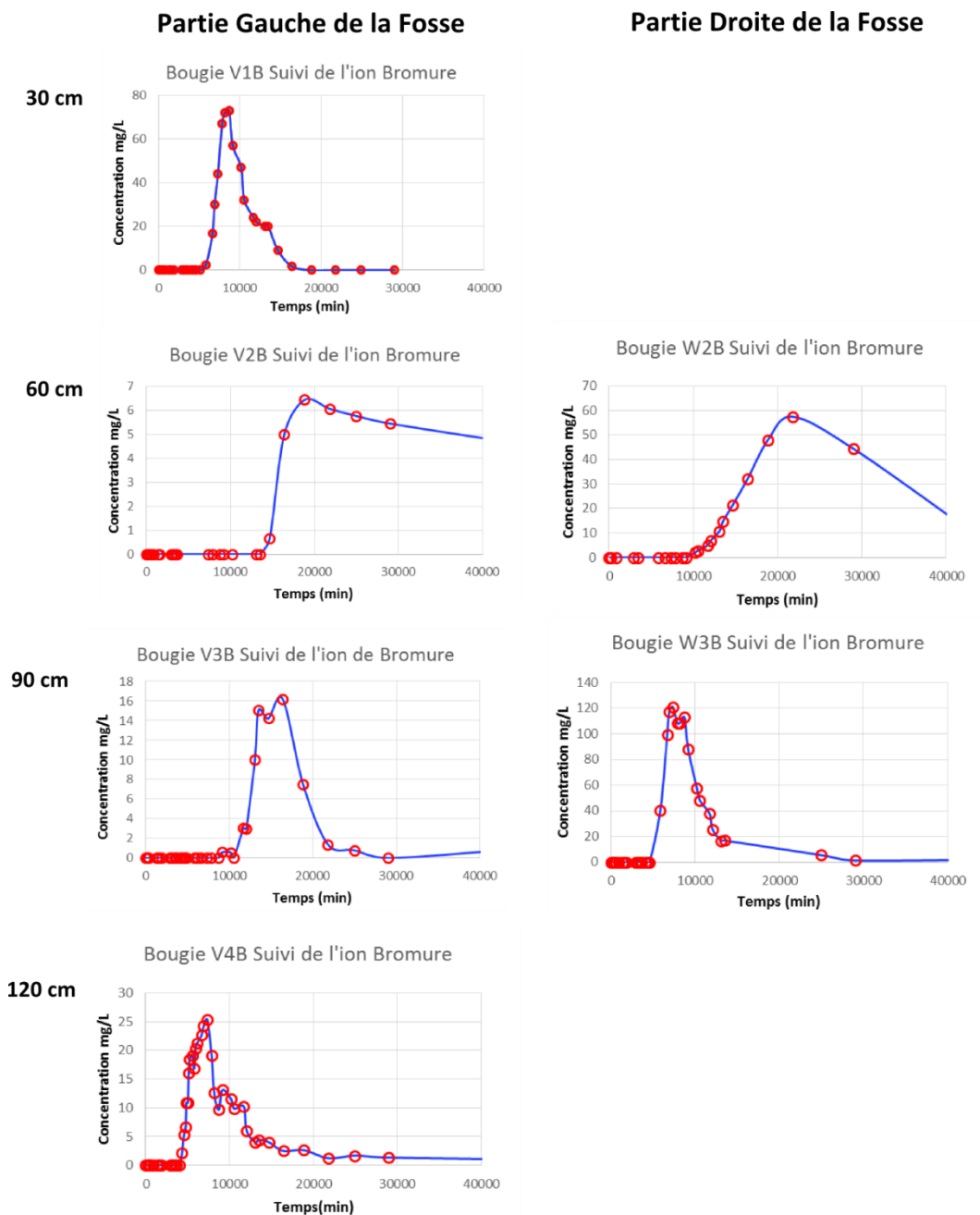


Figure 91: Suivi de la concentration en ion bromure dans les échantillons de la solution récupérés à l'aide des bougies poreuses.

4.2.1.2 Partie droite de la fosse

Pour cette partie de la fosse (Figure 91), les bougies poreuses W1B (30 cm) et W4B (90 cm) n'ont pas donné d'eau, d'où l'impossibilité de doser l'ion bromure. Pour les bougies W2B et W3B, la forme des courbes de restitution sont très différentes. La courbe de restitution de la bougie W2B est très étalée dans le temps et montre une grande dispersion, tandis que la courbe de restitution de la bougie W3B dessine un pic étroit. Les concentrations atteintes dans ces deux bougies sont très importantes en comparaison des concentrations atteintes dans les bougies de la partie gauche de la fosse. Le taux de restitution calculé est très faible (0,0074 %) pour la bougie W2B et faible (0,025 %) pour la bougie W3B.

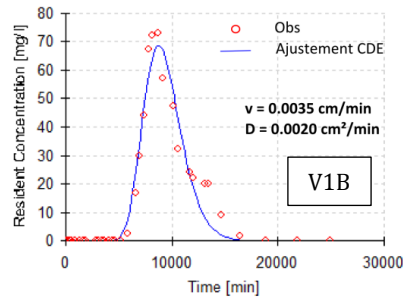
4.2.2 Ajustement STANMOD

L'ensemble des courbes exceptée la courbe issue de la bougie V2B ont été ajustées à l'aide de STANMOD pour obtenir des vitesses de transport et des coefficients de dispersion hydrodynamique (Figure 92). L'ajustement de type eau mobile-eau immobile (MIM) n'améliore pas le R^2 , excepté pour la courbe de restitution de la bougie V4B. L'ajustement MIM n'améliore pas le R^2 , ni l'ajustement de la courbe sur la queue d'élution pour la courbe de restitution de la bougie V1B.

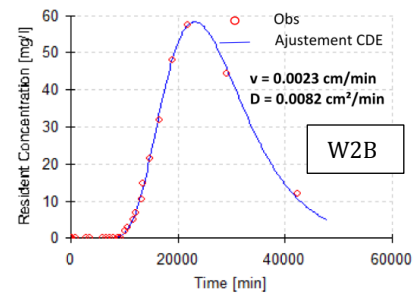
Partie Gauche de la Fosse

Partie Droite de la Fosse

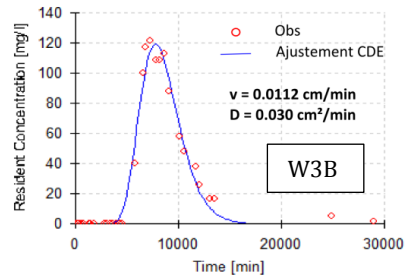
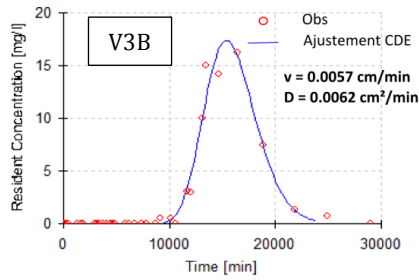
30 cm



60 cm



90 cm



120 cm

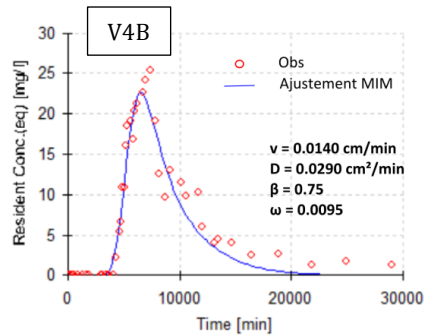


Figure 92: Concentration en bromure et ajustement au modèle CDE ou MIM

4.2.3 Discussion

4.2.3.1 Interprétation des écoulements à l'échelle de la fosse

Trois types d'écoulements semblent régir le transfert du bromure à travers le volume de calcaire (Figure 93) :

- Un premier type d'écoulement est observé à partir des bougies poreuses V4B et W3B. Les temps d'arrivée des ions bromures pour ces deux bougies sont très brefs, compte tenu de leur profondeur. Ce type d'écoulement souligne une forte réactivité en terme de transfert hydrodynamique, caractéristique d'écoulements préférentiels à travers le massif calcaire.
- Le second type d'écoulement est observé pour les points de restitution V3B et V1B. Les temps de séjours de ces deux bougies est cohérents avec leur profondeur d'implantation. Ce type correspond à une réactivité hydrodynamique moyenne, témoin d'un écoulement au sein d'une matrice.
- Le troisième type d'écoulement est observé au niveau des points de restitution V2B et W2B. Les temps de séjour estimés à partir de ces deux bougies semblent très importants au vu de leur profondeur d'implantation. Ce type d'écoulement correspond à un milieu de faible réactivité hydrodynamique, témoin d'un écoulement au sein d'une matrice peu perméable.

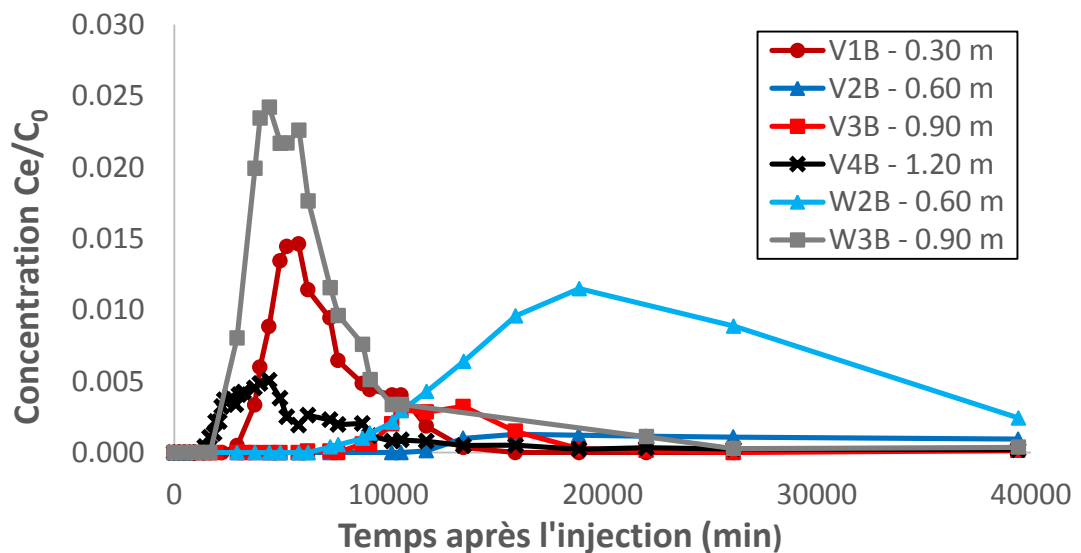


Figure 93: Ensemble des courbes de restitution obtenues à partir des 6 bougies poreuses

4.2.3.2 Estimation des paramètres de transport à partir des données de terrain

Des paramètres de vitesse et de dispersion ont été obtenus à partir de l'ajustement d'un modèle d'écoulement de type CDE. Les ajustements de type MIM n'améliorent pas les R^2 , excepté pour V4B (Tableau 26). La dispersion hydrodynamique de la fosse est différente entre la partie gauche et la partie droite de la fosse. En moyenne, la dispersion hydrodynamique est de 1,1 cm pour la partie gauche, et de 3,1 cm pour la partie droite de la fosse. Les vitesses varient fortement, avec une variation jusqu'à un ordre de grandeur. Les plus fortes vitesses sont obtenues pour des écoulements décrits comme à forte réactivité en terme de transfert hydrodynamique.

Tableau 26 : Estimation des paramètres de transport à partir des ajustements STANMOD sur les courbes de restitutions sur le terrain.

Nom de la bougie	V1B	V3B	V4B	W2B	W3B
Profondeur de la bougie (cm)	30	90	120	60	90
Type d'ajustement	CDE*	CDE	MIM**	CDE	CDE
v (cm/min)	0,0035	0,0057	0,0140	0,0024	0,0112
D (cm ² /min)	0,0020	0,0062	0,0229	0,0083	0,0302
λ (cm)	0,58	1,09	1,64	3,47	2,69
R ²	0,95	0,97	0,93	0,99	0,98
β			0,75		
ω			0,0095		
α (min ⁻¹)			1,3E-06		

*CDE : Equation de convection-dispersion, **MIM : Modèle eau mobile- eau immobile.

4.2.3.3 Etude multi-échelle des paramètres de transport

Les valeurs et les moyennes de la dispersion hydrodynamique obtenues entre ces deux parties de fosses sont cohérentes avec les valeurs obtenues en laboratoire sur colonnes. Le contraste de la dispersion hydrodynamique entre les faciès homogènes/hétérogènes est du même ordre de grandeur (§3.1.2.3). Le paramètre de vitesse est dépendant de la densité de flux imposé

à la surface d'injection. Cette densité de flux était de 0,14 mm/h sur le terrain. La différence entre la densité de flux appliquée sur la colonne (4 mm/h) et la densité de flux appliquée sur la fosse (0,14 mm/h) explique la différence entre les vitesses ajustées sur le terrain et en laboratoire.

4.2.4 Synthèse

Les observations réalisées à partir des 6 points de mesure du profil montrent des tendances différentes qui vont à l'encontre des idées préconçues. Dans le cas présent, ce sont les points de prélèvement les plus éloignés de la surface d'injection qui restituent en premier le traceur, preuve d'une forte hétérogénéité des écoulements à l'échelle de la fosse. Les formes variées des courbes de restitution et les temps de restitution montrent que les vitesses de transit ne sont pas linéaires au sein de la zone non saturée des Calcaires de Beauce sur le site d'étude.

Cette étude a permis de mettre en évidence trois types d'écoulement : des écoulements rapides, témoins de chemins préférentiels au sein du massif calcaire, des écoulements plus lents au sein de la matrice de calcaire, des écoulements très lents au sein d'une matrice peu perméable.

L'estimation des paramètres de transport montre une forte hétérogénéité du milieu entre la partie gauche et la partie droite de la fosse. Les valeurs de dispersion sont cohérentes avec les valeurs obtenues en laboratoire.

4.3 Traçage au bleu brillant

L'expérience de traçage au bleu brillant fait suite aux résultats obtenus pour le traçage à l'ion bromure. Ce dernier a mis en évidence trois types d'écoulement au sein du massif calcaire. Le traçage au bleu brillant a été mis en place pour visualiser les types d'écoulements au sein de ce même massif et d'observer l'impact des lithologies sur l'écoulement.

4.3.1 Description des écoulements

4.3.1.1 Forme du front d'infiltration

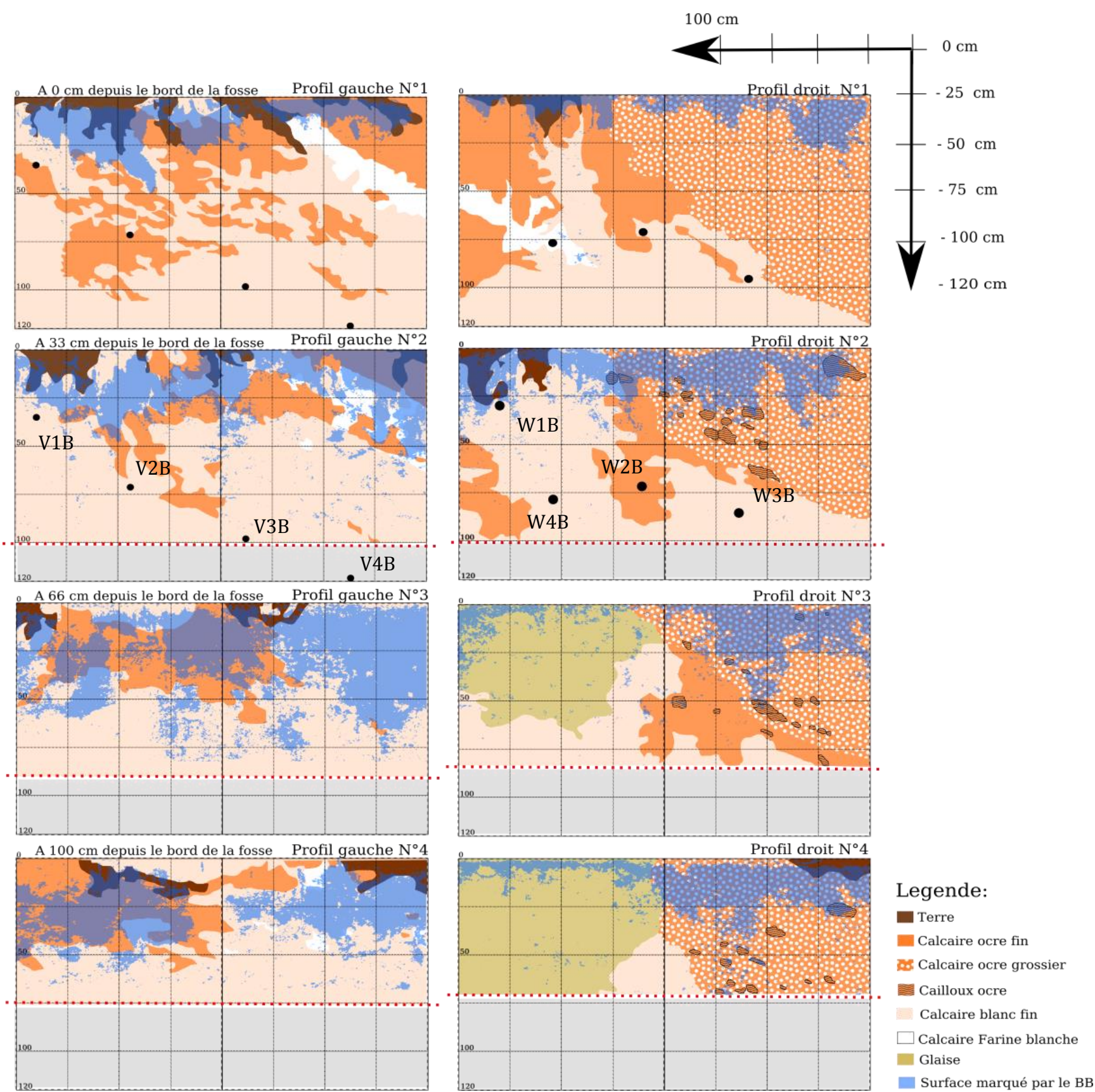
On observe que la profondeur du front d'infiltration du BB entre les profils gauche (-G) et droit (-D) est très inégale, ainsi que la profondeur du front au sein des profils -G (Figure 94).

Pour les profils -G, le front d'infiltration est de plus en plus profond avec l'éloignement du bord de la fosse (0, 33, 60, 100 cm depuis le bord de la fosse). A 0 et 33 cm du bord, le front d'infiltration forme des doigts de gants qui prennent une orientation oblique (120°). A 66 et 100 cm, le front est largement dispersé sur toute la profondeur sans orientation apparente.

Pour les profils-D, la profondeur du front d'infiltration ne varie pas avec la distance au bord de la fosse. Celui-ci reste en grande partie dans les premiers cinquante centimètres du profil. A 0 et 33 cm, le front présente une forme en doigts de gants verticaux, souvent localisés en aval ou autour des intrusions de terre. A 66 et 100 cm, le front est plus profond avec des écoulements obliques (Figure 94).

Le front d'infiltration est devancé par une multitude d'écoulements rapides et isolés (tâches de BB) pour l'ensemble des profils.

Figure 94: Cartographie du bleu brillant pour tous les profils



4.3.1.2 Distribution des écoulements

4.3.1.2.1 Distribution statistique

En moyenne, ces écoulements rapides et isolés représentent 3,7 % des zones colorées par le BB (2,8 % pour les profils -G, 4,2 pour les profils-D) (Figure 95).

Dans les profils-G, les proportions entre écoulements rapides et écoulement global au sein de chaque lithologie sont proches. Les lithologies les plus importantes dans les profils -G sont ocre fin et blanc fin, avec une proportion plus importante de blanc fin (entre 50-70 %). Il existe une plus forte variabilité des proportions entre les types d'écoulements entre les différents profils -D, mais il existe également une plus grande diversité de lithologies sur ces profils -D. Les lithologies les plus importantes des profils -D sont en premier ocre grossier (entre 30-43%), puis blanc fin (entre 7-43%), glaise (entre 28-43%) et enfin ocre fin (entre 13-22%).

Le calcaire farine blanche porte une proportion conséquente d'écoulements rapides au vu de sa surface (Figure 95, profil-D 0 cm). Pour les profils-D à 66 et 100 cm, les proportions importantes d'écoulements rapides dans les lithologies blanc fin et fin ocre sont des artefacts dus à la profondeur d'apparition (20 cm pour le profil-D n°3 et 42 cm pour le profil-D n°4) de cette lithologie au sein du profil (Figure 94). Pour le profil-D n°1, la forte proportion d'écoulements rapides sur l'écoulement global dans la lithologie farine blanche (78 %) est également due à la présence en profondeur (75 cm de profondeur en moyenne) de cette lithologie. Aucune des lithologies sur aucun des profils ne semble favoriser les écoulements rapides au détriment des écoulements globaux.

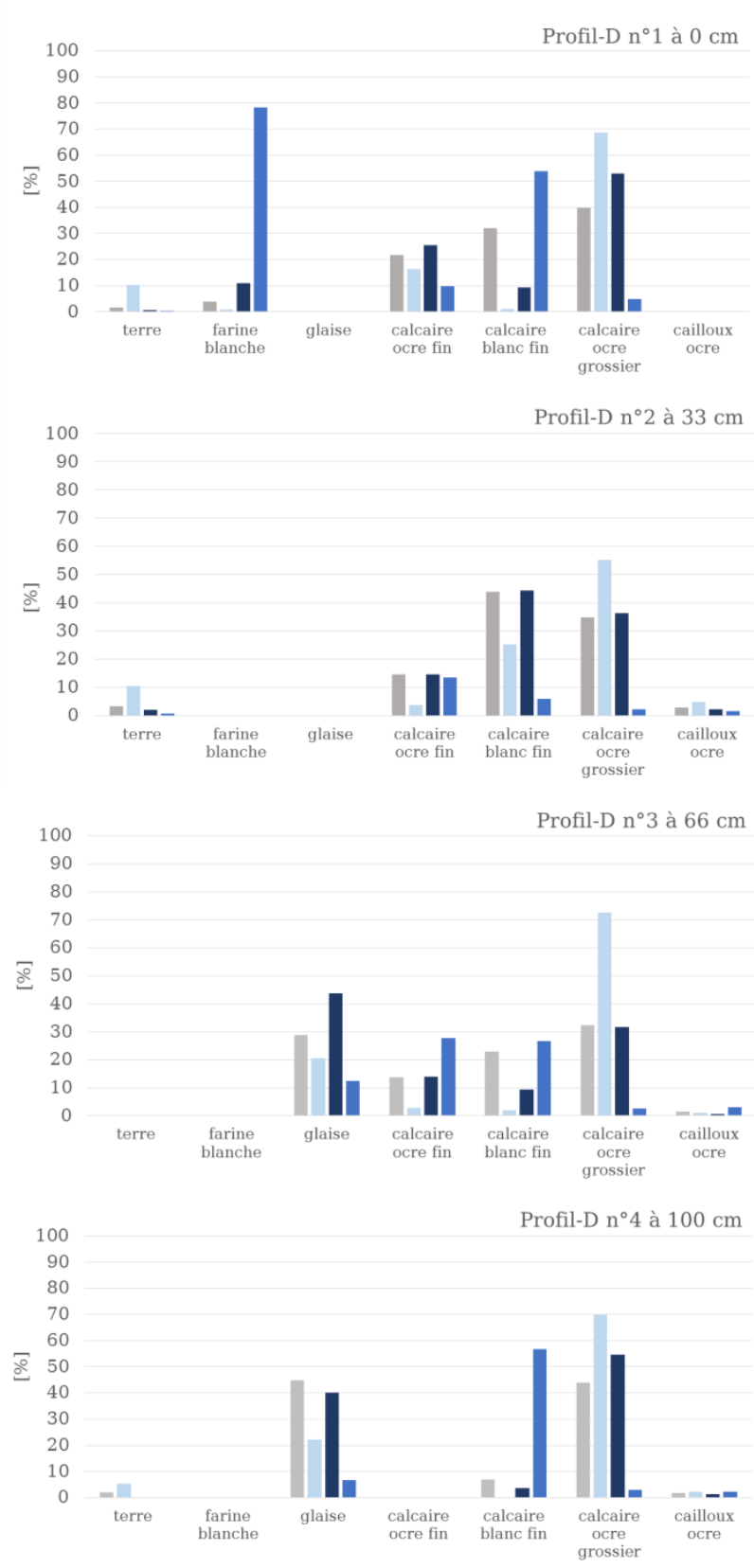
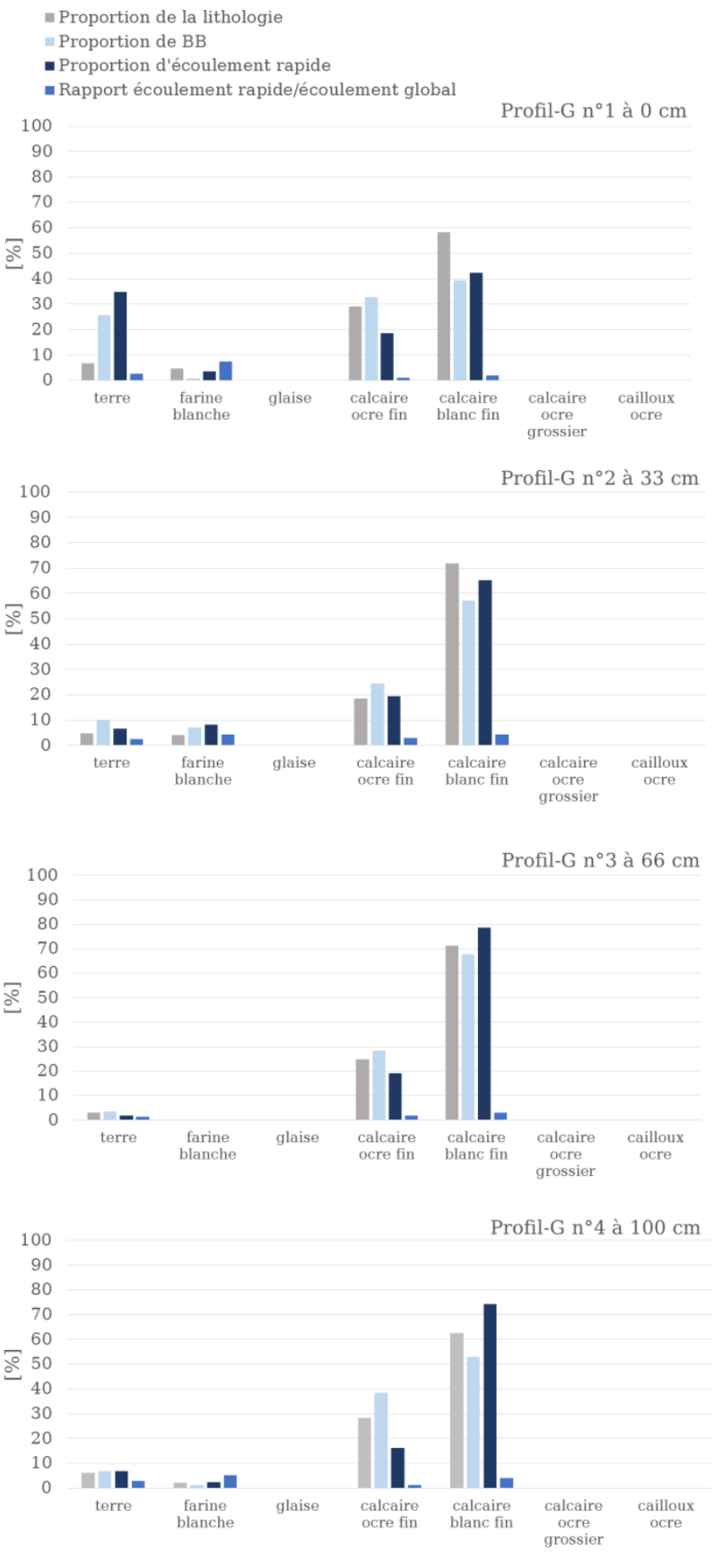


Figure 95 : Statistiques de distribution des écoulements

4.3.2 Dispersion hydrodynamique

4.3.2.1 Analyse dans le plan (x,y)

La forme du front peut-être simplifiée en 1D par un graphique de couverture de BB en fonction de la profondeur (Figure 96).

Pour les profils-G, la couverture de BB forme des pics larges avec un maximum (entre 5 et 35 cm de profondeur) et un étalement croissant avec l'éloignement depuis le bord de la fosse. La couverture de BB pour les profils-D est de la même forme pour toutes les distances au bord de la fosse. La couverture de BB forme un pic étroit entre 5 et 15 centimètres de profondeur et s'atténue rapidement jusqu'à 40 cm de profondeur. La vitesse et l'écart-type sont plus importants pour les -G profils que pour les profils-D (Tableau 27). Les valeurs de vitesse obtenues pour les profils-G sont cohérentes avec les valeurs obtenues pour le traçage à l'ion bromure (§ 4.2.3.2). En revanche, les valeurs de vitesses obtenues pour les profils-D ne sont pas du même ordre de grandeur et sont beaucoup plus faibles.

Tableau 27 : Statistiques de recouvrement du Bleu Brillant

		Profils -G		Profils -D	
Y	Temps après injection	Profondeur du maximum	Vitesse d'infiltration	Profondeur du maximum	Vitesse d'infiltration
	(h)	(cm)	(cm/min)	(cm)	(cm/min)
0 cm	66	10,6	0,0026	4,1	0,0010
33 cm	70	20,4	0,0048	6,1	0,0014
66 cm	72	10,4	0,0023	3,7	0,0008
100 cm	90	31,0	0,0056	4,7	0,0008
	Moyenne	18,1	0,0038	4,6	0,0010
	écart type	9,8	0,0015	1,1	0,0003

La couverture de BB sur l'ensemble du profil peut être décrite à l'aide d'une gaussienne simple ou double, selon la forme de la courbe (avec un R^2 toujours supérieur à 0.9). La courbe de la couverture de BB pour les profils-D peut être décrite par une forme de pic serré de forte amplitude, avec un

maximum de recouvrement à faible profondeur, entre 5 et 15 cm de profondeur. Les profils-G ont des pics amples avec des maximums entre 5 et 35 cm de profondeur.

La couverture de BB sur des colonnes de 25 cm de large montre l'impact de la lithologie sur la forme de la courbe de couverture de BB. On observe que les courbes de BB dans la lithologie glaise ont des pics serrés à faible profondeur. Les courbes de BB dans les lithologies blanc fin sont très étalées avec la profondeur (Figure 96 Profil-G à 66 cm).

4.3.2.2 Analyse dans le plan (y,z)

La profondeur du maximum de BB, obtenu à partir de la forme des courbes de recouvrement par le BB (Figure 96), est représenté, Figure 97, en fonction de la distance au bord de la fosse (axe y). La profondeur maximum est présentée par chaque barre, celle-ci étant teinté selon la lithologie majeure dans laquelle se trouve le maximum de pénétration du BB. Si une lithologie secondaire est présente à proximité du maximum de pénétration, la couleur de celle-ci est représentée sur les arrêtes des barres.

Pour les profils-G, le maximum de pénétration se trouve majoritairement dans la lithologie calcaire blanc fin. Le passage de la lithologie calcaire blanc fin à une autre lithologie (calcaire ocre fin) induit quasiment systématiquement une régression dans la profondeur du maximum de recouvrement du BB ou au moins une absence de progression dans le transfert du BB vers la profondeur (profils-G 1, 2, 3).

Pour les profils-D, le maximum de pénétration, dont la profondeur est beaucoup plus faible que pour les profils-G, est porté principalement par la lithologie calcaire ocre grossier, avec une grande variabilité de profondeur dû aux variations locales du faciès.

Les ajustements gaussiens obtenus dans des lithologies pures permettent d'estimer le paramètre de dispersion pour les trois lithologies majeures (Tableau 25). Les valeurs obtenues par cette méthode sont beaucoup plus importantes que les valeurs obtenues en laboratoire.

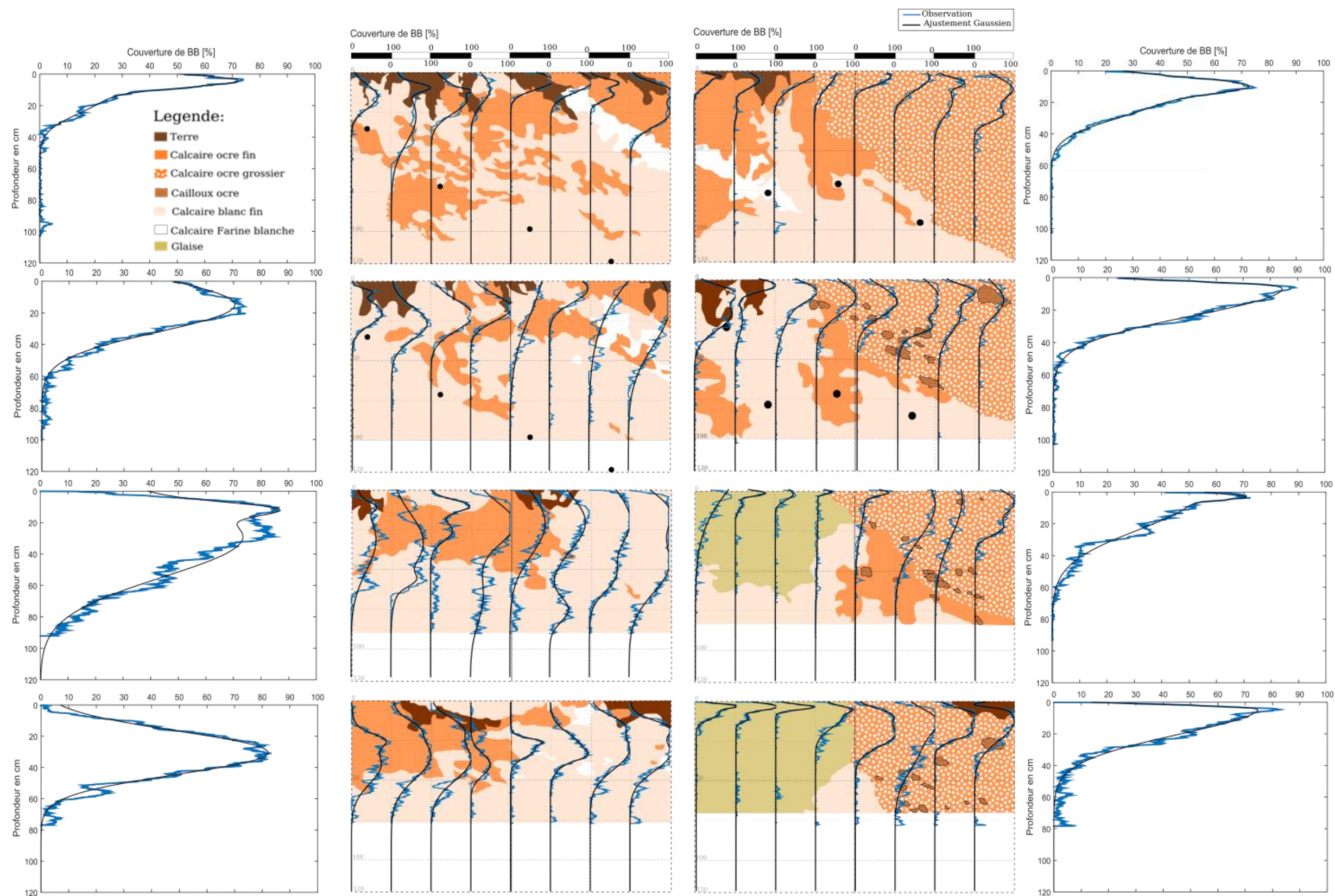


Figure 96: Couverture de bleu brillant sur l'ensemble de chaque profil et par mini-colonne de 25 cm de large pour chaque profil en lien avec les lithologies

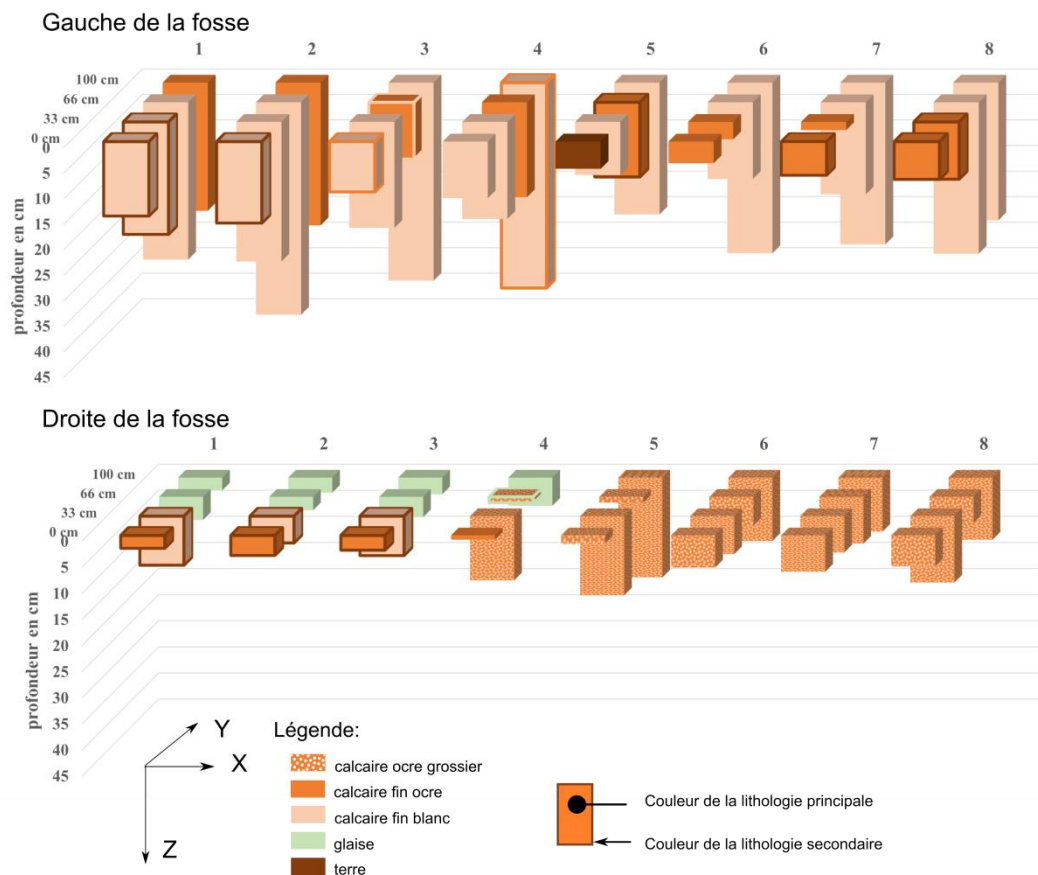


Figure 97: Histogramme de distribution du maximum de recouvrement de bleu brillant en fonction de la distance (y) au bord de la fosse. La lithologie principale contenant ce maximum (et la lithologie secondaire si celle-ci est présente)

4.3.3 Discussion

4.3.3.1 Impact des propriétés de la ZNS sur le déplacement du traceur

L'agencement géométrique des lithologies (globalement – 120° dans le plan (x,z)) semble avoir une influence sur la forme du front d'infiltration. Lorsqu'une structure orientée est clairement visible (Figure 94), le front d'infiltration prend une orientation oblique qui se traduit par des figures en doigts de gant obliques. Lorsque cette structure n'est pas visible, ou que celle-ci est disposé horizontalement, les écoulements semblent se faire verticalement. Les écoulements en doigts de gant se trouvent en aval d'intrusion terreuse, ce qui indique que ces figures d'écoulement se produisent lors d'un changement dans les propriétés du matériau (Weiler et

Flühler, 2004). La progression du front est contrainte par les propriétés du matériau qu'il traverse.

Dans les profils -G (à $y = 0$ et 33 cm), on observe quelques figures de contournement par le BB à l'approche de la lithologie ocre fin, ce qui engendre une progression asymétrique du front d'infiltration (Figure 95). Ce contournement peut s'expliquer par un contraste de la conductivité hydraulique entre la lithologie calcaire ocre fin, dont la conductivité hydraulique est plus faible que celle de la lithologie calcaire blanc fin (Tableau 25). Pour les profils -G à $y = 66$ et 100 cm, le panache de BB est réparti de façon plus homogène au sein du profil, même si sa forme est en cohérence avec les différences de lithologie. L'écoulement se fait de façon homogène à travers la matrice au sein d'une même lithologie.

Dans les profils-D, la glaise engendre un retard important dans la progression du front d'infiltration et provoque une forte asymétrie au sein des profils-D à $y = 66$ et 100 cm (Figure 96). Les fins filets de BB dans la glaise illustrent un écoulement porté par les macropores (restes racinaires visibles à l'œil nu) en faible interaction avec la matrice glaiseuse (Figure 94). L'écoulement dans la lithologie ocre grossière empreinte principalement les passages caillouteux et s'orientent à 120° vers la droite.

Le maximum du pic de recouvrement du BB est toujours porté par la lithologie avec la conductivité hydraulique la plus importante, et l'insertion d'une lithologie aux propriétés moins favorables (K, diamètre des pores) engendre une diminution de la profondeur du pic de BB.

4.3.3.2 Impact des propriétés de la ZNS sur la dispersion hydrodynamique

La couverture de BB en fonction de la profondeur montre des formes différentes selon les deux types de profils (-G et -D) (Figure 96). Les découpes de chaque profil ont réalisées en un minimum de temps possible. Malgré tout, les quatre profils ne sont pas simultanés. Il existe un délai entre chaque découpe (Tableau 27). Les quatre profils -D ont une forme similaire,

sans évolution importante au cours du temps (à $t = 66$ h, 70 h, 72 h, 90 h après l'injection), ce qui indique une dynamique d'écoulement très lente. En revanche, la forme de la couverture de BB pour les profils -G évolue en fonction du temps : le maximum de pénétration et l'étalement de la courbe augmentent avec le temps depuis l'injection. Les profils-G ont une dynamique 3,8 fois plus rapide. La différence importante dans les écarts-types montre que la dynamique de dispersion du BB au sein de la fosse est très variable spatialement (Tableau 27).

La dispersion hydrodynamique est plus importante pour la lithologie calcaire blanc fin et moins importante pour le calcaire ocre fin et encore moins importante pour le calcaire ocre grossier. Les valeurs obtenues à partir de cette méthode ne sont pas cohérentes avec les valeurs obtenues pendant les expériences d'élutions et lors du premier traçage à l'ion bromure.

Cette méthode est basée sur les courbes de recouvrement du BB, alors que la dispersion estimée à partir du traçage à l'ion bromure sur le terrain et en laboratoire est obtenue sur des courbes de concentration. L'expérience de traçage au BB est donc purement qualitative, les données de concentration de BB n'étant pas disponibles.

4.3.3.3 Interprétation des mécanismes de transfert

Le traçage au bleu brillant et la destruction de la fosse a permis de visualiser les chemins suivis par l'écoulement de l'eau et les types d'écoulements au sein du massif de calcaire. Les trois types d'écoulement identifiés au cours du traçage au Br^- ont été visualisés au cours du traçage au BB.

Les figures d'écoulement en doigts de gant ou d'écoulement vertical localisé (type conduit racinaire ou fracturation) sont des figures d'écoulement préférentiel. Ces figures d'écoulement sont issues d'un contraste de perméabilité importante. Dans le cas du massif de calcaire étudié, ces chemins préférentiels peuvent être orientés par une structure héritée du calcaire. La localisation des bougies poreuses en aval de ces chemins

préférentiels (V4B et W3B) (Figure 94) permettent de comprendre l'arrivée précoce de l'ion bromure.

L'écoulement au sein d'une matrice filtrante, décrit dans le traçage à l'ion bromure, peut être illustré lors du traçage au BB par la propagation du BB en panache. Cet écoulement est largement répandu au sein du massif, lorsque les contrastes de perméabilité ne sont pas trop importants et que la structure héritée du Calcaire n'influe pas sur les directions d'écoulement. Ce type d'écoulement peut expliquer les allures des courbes de restitution de l'ion bromure pour les bougies poreuses V1B et V3B (Figure 94).

Plusieurs figures d'écoulement au sein d'une matrice peu filtrante sont visibles. Dans la glaise, hors mis les conduits racinaires, l'ensemble du BB reste dans les premiers centimètres. Le contraste entre écoulement matriciel et écoulement préférentiel est très marqué, puisque la matrice glaiseuse est relativement imperméable. En revanche, ce contraste peut être moins marqué si la perméabilité de la lithologie est plus importante, comme on peut l'observer dans le cas de la lithologie ocre fin. Un contraste de perméabilité entre faciès peut causer des formes de contournement et engendrer un retard de l'arrivée de la concentration, si le point de prélèvement se trouve dans une lithologie contournée par l'écoulement. Ce type de mécanisme peut expliquer l'apparition très tardive de la concentration dans la bougie V2B (Figure 94).

L'absence d'eau dans les bougies poreuses W1B et W4B s'explique par le caractère très imperméable de la lithologie glaiseuse, dans laquelle les bougies poreuses ont été implantées (Figure 94).

4.3.3.4 Intégration de l'hétérogénéité des faciès dans les modèles de prédiction

4.3.3.4.1 Rappel des observations terrain

L'interprétation des écoulements lors du traçage au bromure et la validation lors du traçage au BB montrent l'importance des faciès lithologiques du Calcaire de Beauce dans le déterminisme du transfert des solutés dans la ZNS.

Il est certain qu'une meilleure connaissance des propriétés physiques et physicochimiques de ces différents faciès devrait permettre de mieux comprendre les mécanismes menant à la contamination de la nappe de Beauce. Face à la grande variabilité des faciès et des propriétés hydrodynamiques, il devient évident que la discrétisation spatiale de chaque faciès n'est pas envisageable à court terme pour améliorer les modèles de prédiction des contaminations de la nappe. Cependant, les mécanismes de transfert mis au jour dans ces travaux permettent de proposer une piste pour la prise en compte de l'hétérogénéité des écoulements dans les modèles de vulnérabilité de l'eau potable en Beauce, présentée dans le paragraphe suivant.

4.3.3.4.2 Modèle conceptuel

Les figures de contournement observées lors du traçage au BB montrent que l'écoulement se fait dans la lithologie la plus perméable. Si le traceur est injecté sur cette lithologie alors le traceur reste dans cette lithologie et contourne les zones moins perméables. Si l'injection du traceur se fait sur une lithologie moins perméable, la traversée de cette lithologie jusqu'à une lithologie plus perméable engendre un retard, qui pourrait s'interpréter comme un retard à l'injection. Une fois dans la lithologie la plus perméable le traceur reste dans celle-ci jusqu'à ce qu'il rencontre un autre couche lithologique incontournable (strate horizontale). On peut envisager de traiter les différents mécanismes d'écoulement comme une condition à la limite supérieure variable spatialement lors de l'entrée du soluté dans la ZNS (Figure 98).

Dans le cas d'un faciès filtrant de la ZNS (lithologie calcaire blanc fin et lithologie calcaire ocre grossier), aucun retard n'a été observé. On peut assimiler la concentration de soluté provenant du sol et arrivant dans la ZNS comme une injection de type pulse, c'est-à-dire une concentration constante pendant un certain temps. Dans le cas d'un faciès peu filtrant (lithologie calcaire ocre fin) se trouvant à l'interface sol-ZNS, il a été observé sur le terrain un retard. On peut traduire cet effet de retard dans les premiers

centimètres de la ZNS par une condition à la limite de type puissance décroissante, c'est-à-dire une courbe d'injection décroissante au cours du temps. Cette condition à la limite a pour effet de retarder le soluté et imite l'effet de retard engendré par la présence d'une lithologie moins favorable à l'écoulement au voisinage de l'interface Sol-ZNS. Ce type de condition à la limite permet d'expliquer la forme des courbes de restitution obtenues lors du traçage au Br⁻ (Viel et al., 2016).

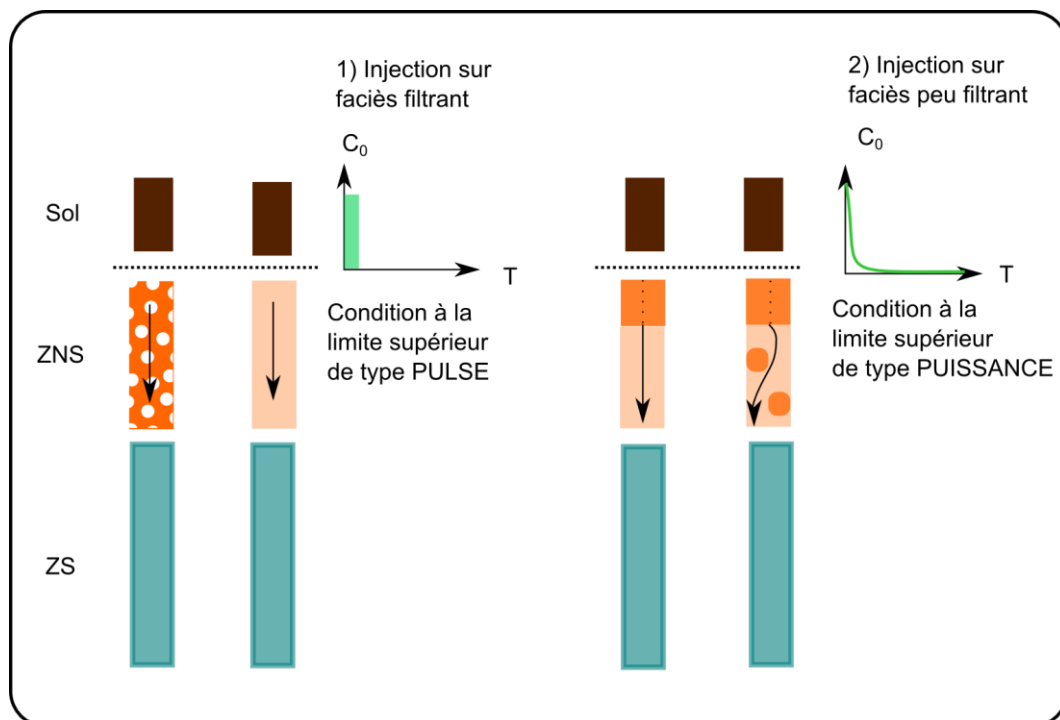


Figure 98 : Modèle conceptuel de l'intégration des faciès dans un modèle global de vulnérabilité de la ressource en eau

4.3.4 Synthèse

Pour comprendre le transfert des solutés vers la nappe, un traçage au BB a été réalisé sur une fosse dont les 40 premiers cm de sol ont été décapés. La forme du front d'infiltration du BB après 66 h d'infiltration est extraite par traitement d'image et les lithologies sont décrites pour chaque profil.

L'analyse d'image montre que le front d'infiltration s'oriente et suit les orientations de la lithologie. L'écoulement n'est donc pas vertical : le front

contourne les zones moins favorables. Le contournement ou l'obligation de passage dans ces zones moins favorables engendrent un retard dans le transfert vers la profondeur. Lorsqu'aucune structure n'est présente, la profondeur du front d'infiltration est plus importante et le panache est dispersé de façon plus homogène. Lorsqu'aucune orientation ne perturbe la propagation du front d'infiltration, on observe que le front contourne des zones moins favorables à l'écoulement. Un contraste de propriétés entre lithologies est vraisemblablement à l'origine des perturbations de la propagation du front d'infiltration. A l'échelle métrique, la vitesse de déplacement des solutés peut être jusqu'à 4 fois plus importante dans la partie gauche que dans la partie droite de la fosse.

L'agencement géométrique engendre une dispersion macroscopique significative, à la fois liée au retard lorsque le front contourne une zone moins favorable ou quand le front est dans l'obligation de la traverser. Lorsque l'agencement lithologique présente une zone favorable à l'écoulement, le front s'y localise en créant des écoulements plus rapides.

Ces résultats montrent l'importance des faciès lithologiques du Calcaire de Beauce dans le déterminisme du transfert des solutés dans la ZNS. Une meilleure connaissance des propriétés physiques et physicochimiques de ces différents faciès devrait permettre de mieux comprendre les mécanismes menant à la contamination de la nappe de Beauce.

5 Chapitre 5 : Synthèse et perspectives

5.1 Synthèse

5.1.1 Observations expérimentales

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont pu mettre en évidence des phénomènes hors équilibres dans la ZNS des Calcaires de Beauce.

Au laboratoire, les phénomènes observés sur la colonne de calcaire hétérogène se sont traduits, dès l'étude en régime permanent, par des courbes de percée asymétriques. La baisse de concentration à la reprise du flux pour les régimes transitoires d'interruption de flux sans drainage montre clairement un phénomène de redistribution de la concentration du soluté entre deux domaines d'eau. Enfin, durant les phases de drainage, la baisse de concentration puis l'augmentation de la concentration montre clairement que les phénomènes de transport de soluté ne peuvent pas s'expliquer par des écoulements à l'équilibre, tels que supposés par le modèle de convection-dispersion.

Sur le terrain, à l'échelle de la fosse, un autre phénomène de transport préférentiel ont pu être mis au jour. Le traçage au Br^- a montré que la bougie poreuse la plus profonde restituait le traceur en premier. Outre ce résultat, ce traçage a permis de mettre en évidence trois types d'écoulement au sein du calcaire. Ces trois types d'écoulement se retrouvent dans les observations du traçage au BB qui a suivi. Le traçage au BB a permis de mettre en avant l'impact de l'agencement des lithologies sur les chemins d'écoulements. Des digitations ont pris place lorsqu'un contraste de perméabilité entre différentes lithologies avait lieu.

Les phénomènes hors équilibre mis en avant dans les études expérimentales ne sont pas issus des mêmes mécanismes. Dans les colonnes, les régimes permanents et transitoires ont permis de mettre en évidence un partitionnement de l'eau dû à la variation des conditions à la limite supérieur.

Alors que les phénomènes hors équilibre de type transport préférentiel mis en évidence sur le terrain proviennent d'un contraste de propriétés des faciès du calcaire.

* * *
* *

La déformation des courbes de percée sous l'influence d'un régime transitoire (interruption de flux avec ou sans drainage) reste limitée.

Les expériences d'interruption sans drainage ont montré qu'il y avait une baisse de la concentration du traceur à la reprise du flux, ce qui indique une rééquilibration de la concentration entre de l'eau mobile et de l'eau immobile durant l'interruption de flux, ou une homogénéisation de la concentration entre les différentes tailles de pores contenant l'eau.

Pour les expériences d'interruption de flux avec drainage, l'augmentation de la concentration durant la phase de drainage est difficile à expliquer avec un modèle de transport de type MIM. La succion à la base draine dans un premier temps les pores de plus grosse taille puis des pores de taille de plus en plus réduite. Si des pores de grosse taille sont présent, le drainage de ceux-ci engendre un effet de dilution ce qui explique une baisse légère de la concentration dans la première phase du drainage dans le cas de la colonne hétérogène. Dans la seconde partie du drainage, la vidange des pores de plus en plus petits engendre une augmentation progressive de la concentration.

L'analyse de BB dans les colonnes ont permis de mettre en avant que la présence d'une matrice limoneuse dans certaines lithologies et l'analyse terrain ont montré que les lithologies possédant cette matrice limoneuse était dominantes dans le transport. La présence de BB sur une section est rarement homogène. La répartition du BB sur une section pourrait être contrôlée par la lithologie et en particulier la présence d'une matrice limoneuse au sein de celle-ci.

5.1.2 Etude multi-échelles des phénomènes hors équilibre physique dans la ZNS des calcaires de Beauce

Ces travaux de recherche sont basés sur l'étude de trois volumes distincts. Le plus petit volume étudié est celui de la micro-colonne analysée au micro-tomographe. Cette première échelle d'observation a montré que le calcaire était constitué de grains millimétriques, avec des espaces inter-grains sont plus ou moins remplis d'une matrice limoneuse.

A l'échelle de la colonne d'élution, la cartographie du BB dans les colonnes a montré que le BB était plus présent dans les lithologies avec des espaces inter-grains remplis de matrice. L'interprétation faite des données d'élution acquises à cette échelle sur les mêmes colonnes en régime transitoire tend à montrer que la présence d'une matrice limoneuse est centrale dans le transport des solutés. Les colonnes de calcaire de deux faciès différents, homogène et hétérogène, ont montré des fonctionnements différents. En considérant que le transport du soluté est favorisé par la présence d'une matrice limoneuse, la colonne hétérogène, plus riche en espaces inter-grains vides pourrait contenir une partie d'eau immobile dans les zones sans matrice limoneuse. Ces espaces inter-grains liés à la fraction grossière du calcaire étant peu présents dans la colonne de faciès homogène, l'eau immobile pourrait donc être négligeable dans ce type de matériau. Cette distribution de l'eau immobile pourrait expliquer la différence de comportement vis-à-vis du transport entre le faciès homogène et hétérogène.

Les faciès décrits à l'échelle de la colonne se retrouvent à l'échelle du terrain. Trois lithologies calcaires majeures ont été décrites : calcaire ocre grossier, calcaire ocre fin et calcaire blanc fin. Après caractérisation des colonnes au moment de la découpe, le faciès homogène apparaît en grande partie constitué des lithologies calcaire blanc fin et calcaire ocre fin, alors que le faciès hétérogène est en grande partie constitué des lithologies calcaire ocre grossier et calcaire ocre fin. A l'échelle du terrain, la profondeur du maximum de pénétration et les études statistiques montrent que la lithologie calcaire

blanc fin est la lithologie majeure dans le contrôle des écoulements et du transport de soluté.

Dans l'ensemble des expérimentations réalisées, les phénomènes hors équilibre se sont présentés sous différents cas de figures. Les régimes transitoires sur les colonnes ont montré que des phénomènes hors équilibre apparaissaient lorsque la condition à la limite supérieure de la colonne variait. Sur la fosse, du transport préférentiel est visible lorsqu'un contraste de perméabilité entre deux lithologies est présent. Ce contraste de perméabilité peut s'expliquer par la présence d'une matrice limoneuse entre les grains du calcaire. Les observations sur la colonne hétérogène en régime permanent montrent qu'une partie de l'eau dans la colonne est immobile. Dans cette colonne, les calcaires ocre fin et ocre grossier sont majoritaires. Les espaces inter-grains de ces lithologies semblent propices au stockage d'eau immobile.

* * *
* *

Lorsqu'une pluie importante s'abat à la suite d'une longue période de sécheresse, l'état hydrique (état sec) engendre une arrivée précoce du pic de soluté (Köhne et al., 2004). C'est ce qu'on a pu observer lors de la reprise du flux après drainage sur les colonnes d'élution (§3.2.2.4.2). Si la densité de flux est importante, celui-ci peut mettre en activation les macropores (Pot et al., 2005) et également engendrer une arrivée précoce du pic de soluté. Ainsi, l'état hydrique sec et l'état hydrique humide peuvent tous les deux conduire à une arrivée précoce du pic (Köhne et al., 2004 ; While et al, 1986 ; Clothier and Green, 1994).

Dans cette étude, l'eau immobile a plutôt été attribuée aux espaces inter-grains (cas de la colonne hétérogène). Si, à la suite d'une période de sécheresse, la densité de flux en entrée de la colonne est faible (cas des

expériences réalisées dans cette étude), le flux utilisera les conduits restés humides dans la fraction fine du matériau. Le transport du soluté se fera donc de façon localisée à l'échelle de la section d'écoulement. Ce phénomène a été mis en évidence grâce aux expériences de BB sur les colonnes et grâce aux courbes de percée en régime transitoire avec drainage (§ 3.3.1.3 et §3.2.2.4.1). L'augmentation de la densité de flux en entrée humidifie les conduits préexistants et augmente la zone humide autour de ces conduits jusqu'à atteindre l'eau immobile où peuvent se réaliser des échanges de solutés.

Ainsi, dans une optique de compréhension de la contamination par les nitrates et en suivant ce schéma de fonctionnement, le stockage de soluté (nitrate) s'effectuerait lors de pluies faibles et répétées par phénomène de diffusion vers les zones d'eau immobiles. Le déstockage pourrait avoir lieu lors des fortes intensités de précipitation.

5.1.3 Recommandations techniques

Les expériences sur colonne en régime permanent ont montré une mauvaise reproductibilité des résultats pour les premières expériences réalisées pour de faibles intensités de précipitation. La prise en compte d'un lit de billes de verre est nécessaire pour expliquer les courbes de récession du débit et pour donner une explication de la variabilité des courbes de percée. La modélisation a permis d'appréhender le problème engendré par les billes de verres, qui provoque une impédance à la base de la colonne. Le dispositif ne disposait pas de capteurs pour suivre la teneur en eau et le potentiel matriciel dans le lit de billes de verre. L'épaisseur du lit de bille de verre pourrait être augmenté pour permettre l'instrumentation de ce matériau. A ce jour, aucun substitut n'est utilisé.

* * *
* *

La caractérisation des lithologies de la colonne au moment de la découpe a permis de constater des faciès calcaires différents à l'intérieur des colonnes. Ces faciès locaux ont permis d'expliquer les valeurs obtenues par certaines sondes de teneur en eau et de pression. Finalement, la caractérisation des colonnes a permis de comprendre les valeurs des sondes et a montré la cohérence entre les valeurs des sondes et les faciès de calcaire. Néanmoins, malgré cette cohérence, le caractère hétérogène du matériau engendre l'acquisition de données qui ne sont pas toujours représentatives du fonctionnement hydrique de l'ensemble de la colonne. Peu de solutions peuvent être envisagées pour palier à ce problème hormis la multiplication des capteurs, ou des systèmes d'imagerie permettant de suivre l'ensemble de la colonne.

5.2 Perspectives

5.2.1 Modélisation des courbes en régime transitoire avec un modèle MIM transitoire

Toutes les courbes de percée obtenues dans cette étude n'ont pas été simulées sous HYDRUS-1D. Les quelques simulations réalisées et non présentées dans cette étude montrent que l'ajout des billes de verre est nécessaire pour expliquer les courbes pour les intensités de précipitation moyenne (8 mm/h) et forte (16 mm/h). D'autre part, les simulations en régime transitoire en CDE et MIM(Se) ne permettent pas d'expliquer l'augmentation de la concentration pendant les phases de drainage, et la forme de la courbe de percée pour le second traceur. Les échanges d'eau entre l'eau mobile et l'eau immobile en régime transitoire peuvent être régis par un différentiel de teneur en eau effective dans chaque domaine (Philip, 1968 ; Simunek et al., 2003). Le problème pour transcrire les échanges d'eau entre les deux domaines avec un différentiel de pression est qu'il faudrait avoir connaissance de la courbe de $\theta(h)$ pour les zones contenant l'eau immobile et celles contenant l'eau mobile. Il est cependant préférable de simuler les courbes de percée avec des modèles d'écoulement qui mettent la

différence de potentiel matriciel au cœur des échanges d'eau entre les deux régions (Gerke et van Genuchten, 1993 ; Gwo et al, 1995). Köhne et al. (2004), dans leur étude sur l'estimation inverse des paramètres nécessaires au modèle MIM avec un échange d'eau conduit par un différentiel de teneur en eau (Se) ou de potentiel matriciel (h), concluent que l'estimation MIM(h) est plus robuste.

5.2.2 Modélisation : limite d'une approche 1D

Les expériences en régime transitoire d'interruption de flux avec drainage ont montré des courbes de concentration qui augmentaient durant la phase de drainage. Ce comportement est difficile à interpréter avec un modèle de type MIM, pour lequel la courbe de concentration devrait décroître par effet de diffusion dans la phase immobile. La forme de ces courbes peut s'expliquer par une distribution de la concentration du soluté selon la taille des pores (§3.2.2.4.1). D'après les résultats de cette étude, le soluté est plus concentré dans les pores de petite taille et moins concentré dans les pores de grande taille. Si on considère une section d'écoulement la concentration en soluté n'est donc pas homogène. Or un approche 1D considère la concentration comme homogène à l'échelle de la section et ne permet donc pas de reproduire la courbe de concentration durant la phase de drainage où la taille des pores a un impact important sur la chronologie de la vidange des pores. Pour utiliser une approche 1D sur des matériaux avec une large gamme de taille de pores, il faudrait simuler une courbe d'élution pour des catégories de taille de pores. Les différentes catégories de taille de pores pourraient s'échanger le soluté par diffusion. Ce type de modèle rejoint une approche de type double perméabilité dans le cas de deux dimensions de taille de pores (Gerke and van Genuchten, 1993 et 1996 ; Köhne et al., 2006).

5.2.3 Modélisation : intégration dans les modèles globaux

Cette étude a permis de générer un certain nombre de valeurs de vitesse d'écoulement en régime permanent et de dispersion pour la ZNS des Calcaires de Beauce. Les valeurs obtenues sur le terrain et en laboratoire ont

montré une certaine cohérence et peuvent donc être implémentées dans des modèles d'écoulements globaux (Schnebelen et al., 1999 ; Binet et al., 2016).

En revanche, ces modèles sont pour la plupart utilisés en régime permanent. Ors les expériences en régime transitoire réalisées montrent des comportements particuliers vis-à-vis de la concentration en soluté durant les phases d'interruption avec drainage. Il est donc nécessaire de raisonner à l'aide de modèles de transport de soluté en régime transitoire pour rendre compte au mieux de ces comportements. Ces modèles demanderont donc un bon suivi des apports de contaminants potentiels sur les parcelles et une bonne connaissance des précipitations, ainsi que des vitesses de transport à travers le continuum ZNS-ZS. L'expérience sur le terrain a montré que l'agencement des lithologies peut engendrer du transport préférentiel. Il est aussi nécessaire de connaître la disposition des lithologies dans le continuum ZNS-ZS. Un modèle mécaniste tel que celui décrit ci-dessus est d'une grande complexité et nécessite beaucoup de moyens financiers, humains, matériels pour contraindre tous les paramètres. La géophysique pourrait à terme donner des indices sur l'agencement des lithologies dans le continuum ZNS-ZN, avec, pour critère principal, la présence d'une matrice entre les grains (§3.3.1.4.3). La continuité des caractéristiques des lithologies à l'échelle de la colonne, puis du terrain et la cohérence avec la carte géologique au 1/50 000 montre que la carte géologique est outil fiable dans la spatialisation des lithologies au sein de la ZNS des Calcaires de Beauce (§4.1.3).

L'expertise terrain a montré qu'une lithologie était majeure dans le transport des solutés (lithologie calcaire blanc fin), et que, dans cette lithologie, d'après l'expertise en laboratoire, les phénomènes hors équilibre type MIM sont moins importants que dans les autres lithologies majeures (lithologie calcaire ocre grossier). Le transport par advection est dominant principalement dans cette lithologie et contourne les autres lithologies (ocre fin et ocre grossier). Les autres lithologies peuvent donc être interprétées comme des zones de stockages du nitrate, qui peuvent être mobilisées lors d'interruptions du

fluxs, et lors de mises en eau des espaces inter-grains dues à un apport d'eau important.

Références

- Aeby P., Forrer F., Steinmeier C., Flühler H. (1997). – Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns. *Soil Science Society of American Journal*, 60:33-35.
- Allaire S. E., Roulier S., Cessna J. (2009). – Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 378: 179-204.
- Alletto L., Coquet Y., Vachier P., Labat C. (2006). – Hydraulic conductivity, immobile water content, and exchange coefficient on three soil profiles. *Soil Science Society of American Journal*, 70:1272-1280.
- Ankeny M. D., Ahmed M., Kaspar T. C., Horton R. (1991). – Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 55:467-470.
- Bajracharya K. et Barry D. A. (1997). – Nonequilibrium solute transport parameters and their significance : numerical and experimental results. *Journal of Contaminant Hydrology*, 24:185-204.
- Bear J. (1972). – Dynamics of fluids in porous media. New York Elsevier.
- Beven K. J. et Germann P. F. (1982). – Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18:1311-1325.
- Beven K. J. et Germann P. F. (2013). – Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research*, 49:3071-3092.
- Biggar J. W. et Nielsen D. R. (1967). – Miscible displacement and leaching phenomena. In: Hagen R. M. (Eds), 1967. *Irrigation of Agricultural Lands*, Agron. Monogr. 11, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 254-274.
- Binet S., Essayan V., Hertout A., Dedewanou M., Noël H., Berte L., Bordeau F. (2016). – Engaging stakeholders in assessing the impact of agricultural practice on groundwater quality : the residence time distribution model (RTD). In: Sauvage S., Sanchez-Pérez J. M., Rizzoli A. E. (Eds), 2016. *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Modelling and Software*, July 10-14, Toulouse, France , 4:916-922.
- Bowman R. (1984). – Evaluation of some new tracers for soil water studies. *Soil Science Society of American Journal*, 48:987-993.
- Bowman R. S. et Gibbons, J. F. (1992). – Difluorobenzoates as nonreactive tracers in soil and ground water. *Ground Water*, 30(1):8-14.
- Brusseau M. L. (1992). – Nonequilibrium transport of organic chemicals: The impact of pore-water velocity. *Journal of Contaminant Hydrology*, 9:353-368.
- Brusseau M. L., Qinhong H., Srivastava R. (1997). – Using flow interruption to identify factors causing nonideal contaminant transport. *Journal of Contaminant Hydrology*, 24:205-219.
- Capowiez Y., Sammartino S., Michel E. (2011); - Using X-ray tomography to quantify earthworm bioturbation non-destructively in repacked soil cores. *Geoderma*, 162:124-131.

- Castany G. et Margat J. (1977). – Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM Service géologie national, Orleans, 249 p.
- Cheviron B. et Coquet Y. (2009). – Sensitivity analysis of transient-MIM HYDRUS-1D: Case study related to pesticide fate in soils. *Vadose Zone Journal*, 8:1064-1079.
- Clothier B. E. et Green S. R. (1994). – Rootzone processes and efficient use of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 25:1-12.
- Coats K. H. et Smith B. D. (1964). – Dead-end pore volume and dispersion in porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 4:73-84.
- Coquet Y., Boucher A., Labat C., Vachier P., Roger-Estrade J. (2000). – Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques, Aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des Sols*, 7(1) :7-24.
- Coquet Y., Vaudour E., Benoit P., Bergheaud V., Garnier P., Labat C., Vachier P., Giliot J. M., Michelin J., Alletto L., Moeys J., Delmas M., Cheviron B., Berthier L., Le Bail G., Pitres C., El Krimy Z., Mel M., Longuet A., Cousin I., Nicoullaud B., Dorigny A., Bobachev A., Duval O., King D., Angulo-Jaramillo R., Mubarak I., Fernandez D. (2007). – Caractérisation du risque de contamination de la nappe de Beauce par les pesticides. *Projet de Recherche ESHEL. France : Ministère de l'écologie du développement et de l'aménagement durables*, 62 p.
- Cote C. M., Bristow K. L., Ross P. J. (2000). – Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of low interruption with drainage of the "preferential flow paths". *Journal of Contaminant Hydrology*, 43:191-209.
- Dedewanou M., Binet S., Rouet J. L., Coquet Y., Bruand A., Noel H. (2015a). – Groundwater vulnerability and risk mapping based on residence time distribution: spatial analysis for estimation of lumped parameters. *Water Resource Management*, 29:5489-5504.
- Dedewanou M., Binet S., Noël H., Hertout A., Essayan V., Peyraube N., Alletti M., Viel E., Coquet Y. (2015b). – Transfert d'eau et de nitrates d'origine agricole, des sols vers le captage S1 de la Saussaye (Chartres Métropole). *Construction d'un modèle hydrologique et cartographie des temps de séjour et de la vulnérabilité spécifique au captage. Rapport Univ. Orléans, France*. 173 p.
- De Smedt F. et Wierenga P. J. (1979a). – Mass transfer in porous media with immobile water. *Journal of hydrology*, 41:59-67.
- De Smedt F. et Wierenga P. J. (1979b). – A generalized solution for solute flow in soils with mobile and immobile water. *Water Resources Research*, 15(5):1137-1141.
- Dousset S., Thevenot M., Pot V., Simunek J., Andreux F. (2007). – Evaluating equilibrium and non-equilibrium transport of bromide and isoproturon in disturbed and undisturbed soils columns. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94:261-286.
- Durner W. (1994). – Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2):211-223.
- Fiès J. C. et Bruand A. (1998). – Particle packing and organization of the textural porosity in clay-silt-sand mixtures. *European Journal of Soil Science*, 49(4):557-567.
- Flury M. et Flühler H. (1994). – Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies – A toxicological overview. *Journal of Environmental Quality*, 23(5):1108-1112.
- Flury M. et Flühler H. (1995). – Tracer characteristics of brilliant blue FCF. *Soil Sciences Society of American Journal*, 59:22-27.
- Flury M. et Wai N. N. (2003). – Dyes as tracers for vadose zone hydrology. *Review of Geophysics* 41(1):1002.

- Flury M., Flühler H., Jury W., Leuenberger J. (1994). – Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. *Water Resources Research*, 30(7):1945-1954.
- Forrer I., Papritz A., Kasteel R., Flühler H., Luca D. (2000). – Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing. *European Journal of Soil Sciences*, 51:313-322.
- Gerke H. H. et Köhne J. M. (2002). – Estimating hydraulic properties of soil aggregate skins from sorptivity and water retention. *Soil Science Society of America Journal*, 66 :26-36.
- Gerke H. H. (2006). – Review Article: Preferential flow descriptions for structured soils. *Journal Plant Nutrition and Soil Science*, 169:382-400.
- Gerke H. H. et van Genuchten M. Th. (1993). – A dual porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Research*, 29(2):305-319.
- Gerke H. H. et van Genuchten M. Th (1996). – Macroscopic representation of structural geometry for simulating water and solute movement in dual-porosity media. *Advances in Water Resources*, 19(6):343-357.
- German-Heins J. et Flury, M. (2000). – Sorption of Brilliant Blue FCF in soils as affected by pH and ionic strength. *Geoderma*, 97:87-101.
- Ghodrati M. et Jury, W. A. (1990). – A field study using dyes to characterize preferential flow of water. *Soil Sciences Society of American Journal*, 54(6): 1558-1563.
- Gwo J. P., Jardine P. M., Wilson G. V., Yeh G. T. (1995). – A multiple-pore-region concept to modeling mass transfer in subsurface media. *Journal of Hydrology*, 164:217-237.
- Hendrickx J. M. H. et Flury M. (2001). – Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. In: National Academy Press (Ed.), 2001. *Conceptual Models of Flow and Transport in the Fractured Vadose Zone*, Washington DC. pp 149-187.
- Hendrickx J. M. H., Dekker L. W., Boersma O. H. (1993). – Unstable wetting fronts in water-repellent field soils. *Journal of Environmental Quality*, 22:109-118.
- Hénin. (1980). – Activités agricoles et qualité des eaux. Rapport du sous-groupe Système de Culture, Ministère de l'Agriculture de l'Environnement, Paris, 86 p.
- Jarvis N. J. (1994). – The MACRO model (Version 3.1): Technical description and sample simulations. Tech. Rep., Diss 19. Dep. Soil Sci., Swedish Univ. Agric. Sci., Uppsala.
- Jarvis N. J. (1998). – 7. Modeling the impact of preferential flow on nonpoint source pollution. In: Selim H. M. et Ma L. (Eds), 1998. *Physical nonequilibrium in soils: Modeling and Application*, Chelsea, Michigan. pp 195-221.
- Jarvis N. J., Bergstrom L., Dik P. E. (1991). – Modeling water and solute transport in macroporous soil: II. Chlorides breakthrough under nonsteady flow. *Soil Science Society of America Journal*, 42:71-81.
- Jaynes D. B. (1994). – Evaluation of fluorobenzoate tracers in surface soils. *Ground Water*, 32(4):532-538.
- Jaynes D. B., Logsdon S. D., Horton R. (1995). – Field method for measuring mobile/immobile water content and solute transfer rate coefficient. *Soil Sciences Society of America Journal*, 59:352-356.
- Kasteel R., Vogel H. J., Roth K. (2002). – Effect of non-linear adsorption on the transport behaviour of Brilliant Blue in field soil. *European Journal of Soil Sciences*, 53:231-240.
- Kasteel R. et Burkhart M. (2005). – Characterization of field tracer transport using high-resolution images. *Vadose Zone Journal*, 4:101:111.

- Kasteel R., Garnier P., Vachier P., Coquet Y. (2007). – Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation. *Geoderma*, 137:360-369.
- Köhne J. M., Köhne S., Gerke H. H. (2002). – Estimating the hydraulic functions of dual-permeability models from bulk soil data. *Water Resources Research*, 38(7):1121-1132.
- Köhne J. M., Köhne S., Binayak P., Mohanty P., Simunek J. (2004). – Inverse mobile-immobile modeling of transport during transient flow: effects of between domain transfer and initial water content. *Vadose Zone Journal*, 3:1309-1321.
- Köhne J. M., Binayak P., Mohanty P., Simunek J. (2006). – Inverse dual-permeability modeling of preferential water flow in soil column and implications for field scale solute transport, *Vadose Zone Journal*, 5:59-76.
- Kool J. B., Parker J. C., van Genuchten M. Th. (1985). – Determining soil hydraulic properties from One-Step Outflow experiments by parameter estimation: Theory and numerical studies. *Soil Science Society of America Journal*, 49:1348-1354.
- Landrin, S. (2012) Dans la Beauce, cinquante ans de pollution agricole. *Le Monde Planète*, 12.03.2012 (<http://www.lemonde.fr>) [accède le 08.01.2016]
- Larsson M. H. et Jarvis N. J. (1999) – Evaluation of dual-porosity model to predict field-scale solute transport in a macroporous soil. *Journal of Hydrology*, 215:153-171.
- Logsdon S. D. (2002). – Determination of preferential flow model parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 66 :1095-1103.
- Maget P. et Pointet T. (2006). - 5. Beauce. In : Roux, J-C. (dir.), 2006. Tome 1 Aquifères & eaux souterraines en France. 1^{er} éd. Espagne : BRGM éditions. pp 191-199.
- Nielsen D. R. et Biggar J. W. (1961). – Miscible displacement in soils: I. Experimental information. *Soil Science Society of America Journal*, 25(1):1-5.
- Nkedi-Kizza P., Biggar J. W., Selim H. M., van Genuchten M. Th., Wierenga P. J., Davidson J. M., Nielsen D. R. (1984). – On the equivalence of two conceptual models for describing ion exchange during transport through an aggregated oxisol. *Water Resources Research*, 20(8):1123-1130.
- Öhrström P., Persson M., Albergel J., Zante P., Nasri S., Berndtsson R., Olsson J. (2002). – Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage. *Journal of Hydrology*, 257:164-173.
- Parker J. C., Kool J. B., van Genuchten M. Th. (1985). – Determining soil hydraulic properties from One-Step Outflow experiments by parameter estimation: II. Experimental studies. *Soil Sciences Society of American Journal*, 49:1354-1359.
- Pillet M. A. et Guilbaud A. (2013). - Etudes de bassin d'alimentation de captage du forage S1 de la Saussaye et du forage de la Rosette. Phase 1 : Caractérisation de la ressource et détermination du BAC. Rapport CALLIGEE N13-28054 A, Nantes, France, 51 p.
- Pierret A., Capowiez Y., Moran C. J., Kretzschmar A. (1999). – X-ray computed tomography to quantify tree rooting spatial distributions. *Geoderma*, 90:307-326.
- Pierret A., Capowiez Y., Belzunces L., Moran C. J. (2002) ; - 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma*, 106:247-271.
- Philip J. R. (1968). – The theory of absorption in aggregated media. *Australian Journal of Soil Research*, 6:1-19.

- Pot V., Simunek J., Benoit P., Coquet Y., Yra A., M. J. Martinez-Cordon. (2005). – Impact of rainfall intensity on the transport of two herbicides in undisturbed grassed filter strip soil cores. *Journal of Contaminant Hydrology*, 81:63-88.
- Rao P. S. C., Davidson J. M., Jessup R. E., Selim H. M. (1979). – Evaluation of conceptual models for describing nonequilibrium adsorption-desorption of pesticides during steady-flow in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 43:22-28.
- Russo D., Jury W. A., Butters G. L. (1989). – Numerical analysis of solute transport during transient irrigation: 2. The effect of immobile water. *Water Resources Research*, 25(10):2119-2127.
- Schnebelen N. (2000). – Analyse et modélisation de l'impact de la maîtrise des pratiques agricoles sur la pollution diffuse par les nitrates, application à l'aquifère des Calcaires de Beauce (site de Villamblain). Thèse de doctorat. Sciences de l'Univers, Université d'Orléans, France, 371p.
- Schnebelen N., Lebourg E., Bruand A., Creuzot G. (1999). – Stratification hydrogéochimique et écoulement verticaux dans l'aquifère des calcaires de Beauce (France) : un système anthropisé à forte variabilité spatiale et temporelle. *Géosciences de surface*, 329 :421-428.
- Schnebelen N., Nicoullaud B., Bourennane H., Couturier A., Verbeque B., Revalier C., Bruand Ary., Ledoux Emmanuel. (2004). – The STICS model to predict nitrate leaching following agricultural practices. *Agronomie*, 24:423-235.
- Schwartz R. C., McInnes K. J., Juo A. S. R., Cervantes C. E. (1999). – The vertical distribution of a dye tracer in a layered soil. *Soil Science*, 164(8):561-573.
- Seguin J. J. (1987). – Teneurs en nitrates dans la nappe des Calcaires de Beauce. Modélisation et prévision. Rapport BRGM 87 SGN 192 EAU, 99 p.
- Selim H. M., Davidson J. M., Mansell R. S. (1976). – Evaluation of two-site adsorption-desorption model for describing solute transport in soil. In: *Proc. Summer Computer Simulation Conf.*, Washington, DC. 12-14 July 1976. Simulation Councils, La Jolla, CA. pp 444-446.
- Simunek J., Jarvis N. J., van Genuchten M. Th., Gardenas A. (2003). – Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of Hydrology*, 272:14-35.
- Simunek J., van Genuchten M. Th., Sejna M. (2005). – The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0. HYDRUS Software Service Dep. Environ. Sci., Univ. of California, Riverside.
- Simunek J., et van Genuchten M. Th. (2008). – Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. *Vadose Zone Journal*, 7:782-797.
- Simunek J., van Genuchten M. Th., Sejna M. (2009). – The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 4.08. Dep. Environ. Sci., Univ. Riverside, California, 332p.
- Simunek J., van Genuchten M. Th., Sejna M. (2011). -HYDRUS: Model use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and biological engineers*, 55(4):1261-1274.
- Toride N., Leji F. J., van Genuchten M. Th. (1999). – The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments, Version 2.1. US Salinity Lab Research Report 137, USDA-ARS, Riverside, California, 119p.

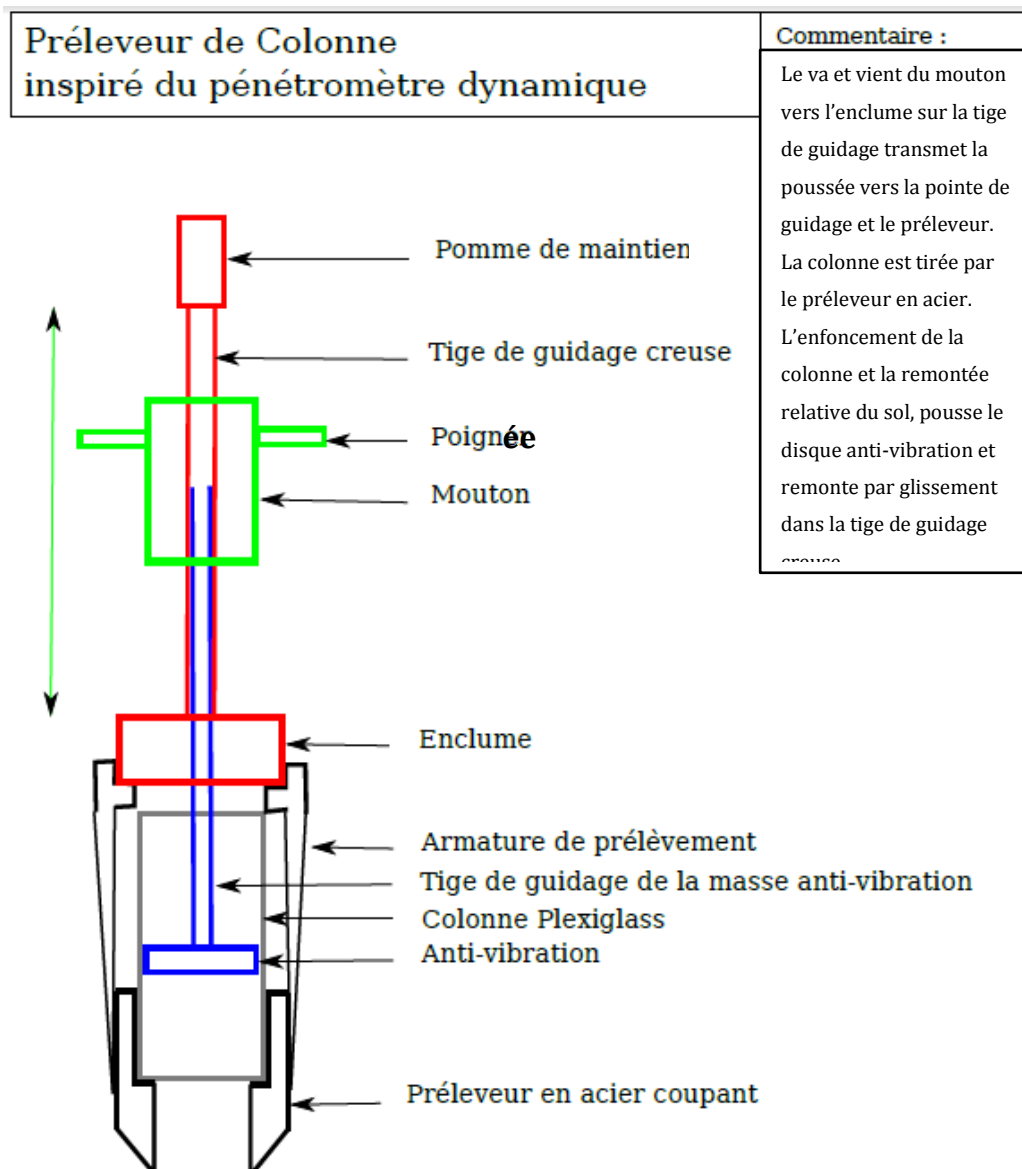
- Vachier P., Cambier P., Prost R. (1979). – Structure d'un milieu poreux : la craie. *Annales d'agronomie*, 30(3) :247-263.
- van Genuchten M. Th. et Wagenet R. J. (1989). – Two-Site/Two-Region models for pesticide transport and degradation: theoretical development and analytical solutions, *Soil Science Society of America Journal*, 53(5):1303-1310.
- van Genuchten M. Th. et Wierenga P. J. (1976). – Mass transfer studies in sorbing porous media: I. Analytical Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 40(4):473-480.
- van Genuchten M. Th., Wierenga P. J., O'Connor G. A. (1977). – Mass transfer studies in sorbing porous media: III. Experimental Evaluation with 2,4,5-T. *Soil Science Society of America Journal*, 41:260-285.
- van Genuchten 1978
- van Genuchten M. Th. (1980). – A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5):892-989.
- van Genuchten M. Th., Leij F. J., and Yates S. R. (1991). - The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- Vanderborght J., Mallants D., Vanclooster M., Feyen J. (1997). – Parameter uncertainty in mobile-immobile solute transport model. *Journal of Hydrology*, 190:75-101.
- Vauclin M. (1994). – Modélisation du transport de solutes dans la zone non saturée du sol. *Revue des Sciences de l'Eau*, 1 :81-102.
- Viel E., Dedewanou M., Coquet Y., Binet S. (2016). – Evidence of contaminant storage at the soil/vadose zone interface and implication for nitrate residence time modeling in groundwaters. In: Sauvage S., Sanchez-Pérez J. M., Rizzoli A. E. (Eds), 2016. *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Modelling and Software*, July 10-14, Toulouse, France , 4:954-960.
- Vogel H. J., Cousin I., Ippisch O., and Bastian P. (2006). – The dominant role of structure for solute transport in soil: experimental evidence and modelling of structure and transport in a field experiment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10: 495-506.
- Wang K., Zhang R., Yasuda H. (2006). – Characterizing heterogeneity of soil water flow by dye infiltration experiments. *Journal of Hydrology*, 328: 559-571.
- Wang K., Zhang R., Yasuda H. (2009). – Characterizing heterogeneous soil water flow and solute transport using information measures. *Journal of Hydrology*, 370:109-121.
- Weiler M. et Flühler, H. (2004). – Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 120:137-153.
- While R. E., Dyson J. S., Gerstl Z., Yaron B. (1986). – Leaching of herbicides through undisturbed cores of a structured clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, 50:277-283.
- Zurmühl T. et Durner W. (1996). – Modeling transient water and solute transport in biporous soil. *Water Resources Research*, 32:819-829.

6 Annexes

ANNEXE 1: SCHEMA DE PRINCIPE DU PRELEVEUR MANUEL INSPIRE DU PENETROMETRE DYNAMIQUE.	235
ANNEXE 2: PLAN POUR L'ENSEMBLE DU MONTAGE EN LABORATOIRE	236
ANNEXE 3: PLAN DU RESERVOIR DU SIMULATEUR DE PLUIE	237
ANNEXE 4: PLAN DU MAILLAGE HEXAGONAL POUR UNE DISTRIBUTION HOMOGENE.	238
ANNEXE 5: PLAN DU CYLINDRE EN PLEXIGLASS.	239
ANNEXE 6: PLAN CERCLAGE EN ALUMINIUM.	240
ANNEXE 7: PLAN DE L'EMBASE DU DISPOSITIF D'ELUTION SUR COLONNE	241
ANNEXE 8: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°4 SUR LA COLONNE 6 A INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER4).	242
ANNEXE 9: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°5 SUR LA COLONNE 6 A INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER5).	243
ANNEXE 10: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°6 SUR LA COLONNE 6 A INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER6).	244
ANNEXE 11: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°7 SUR LA COLONNE 6 A FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER7).	245
ANNEXE 12: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°8 SUR LA COLONNE 6 A FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER8)	246
ANNEXE 13: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°9 SUR LA COLONNE 6 A FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL6PER9).	247
ANNEXE 14: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°4 SUR LA COLONNE 8 A INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER4).	248
ANNEXE 15: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN	

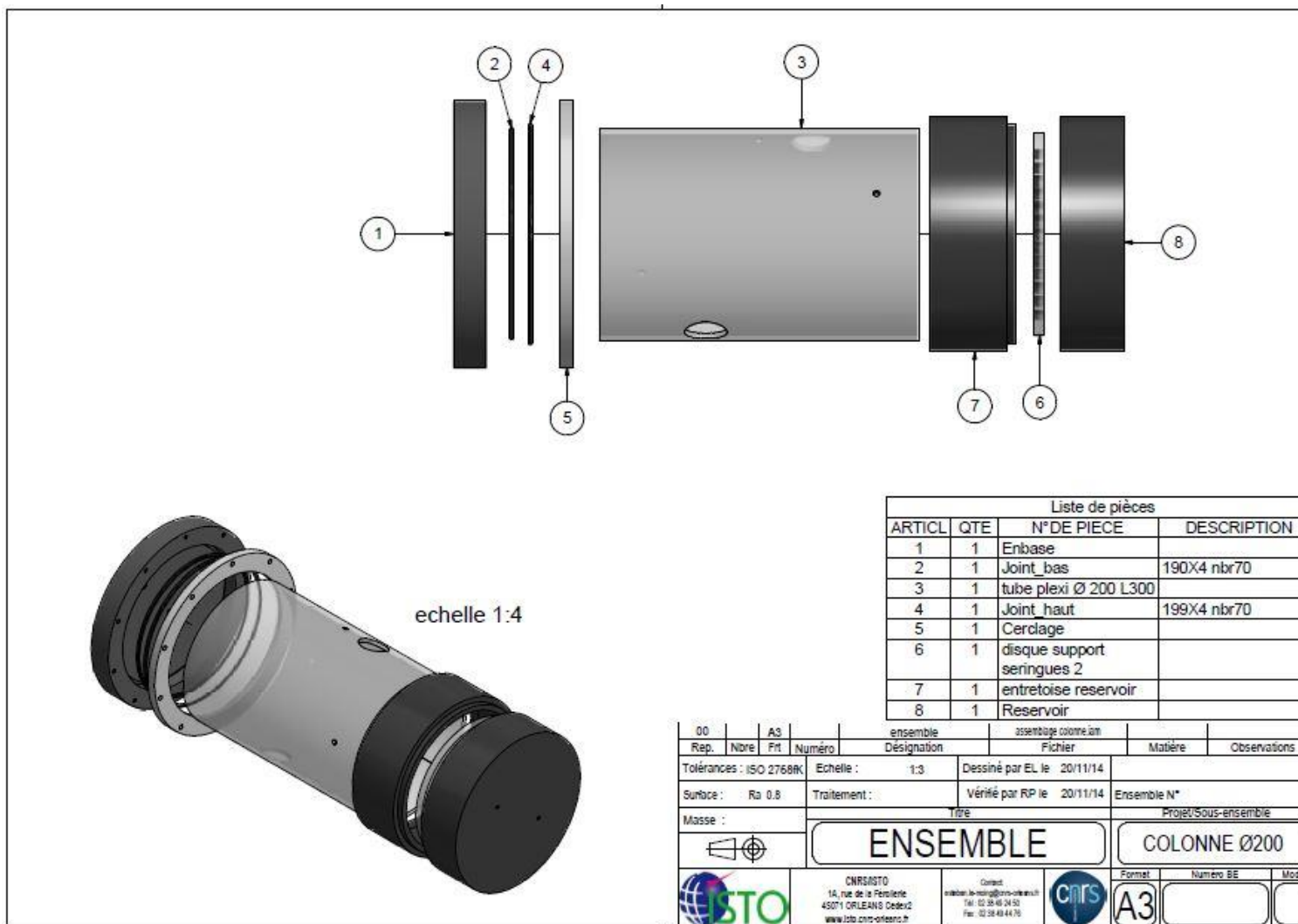
EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°5 SUR LA COLONNE 8 A INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER5).	249
ANNEXE 16: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°6 SUR LA COLONNE 8 A INTENSITE MOYENNE DE PRECIPITATION (8 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER6).	250
ANNEXE 17: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°7 SUR LA COLONNE 8 A FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER7).	251
ANNEXE 18: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°8 SUR LA COLONNE 8 A FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER8).	252
ANNEXE 19: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°9 SUR LA COLONNE 8 A FORTE INTENSITE DE PRECIPITATION (16 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL8PER9).	253
ANNEXE 20: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°1 SUR LA COLONNE 3 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL3PER1).	254
ANNEXE 21: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°2 SUR LA COLONNE 3 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL3PER2).	255
ANNEXE 22: COURBE DE PERCEE AJUSTEE D'APRES UNE EQUATION DE CONVECTION-DISPERSION CLASSIQUE (EN HAUT) ET SUIVIS DU DEBIT, DU POTENTIEL MATRICIEL ET DE LA TENEUR EN EAU (EN BAS) POUR L'EXPERIENCE D'ELUTION N°3 SUR LA COLONNE 3 A FAIBLE INTENSITE DE PRECIPITATION (4 MM/H) EN REGIME PERMANENT (COL3PER3).	256
ANNEXE 23: DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES PORES DE LA COLONNE 6	257
ANNEXE 24: DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES PORES DE LA COLONNE 8	258
ANNEXE 25: COURBES DE RETENTION ET AJUSTEMENT RETC DE LA COLONNE 6	259
ANNEXE 26: COURBES DE RETENTION ET AJUSTEMENT RETC DE LA COLONNE 8	260
ANNEXE 27: COURBE DE RECESSION DU DEBIT DE LA COLONNE 6	261
ANNEXE 28: COURBE DE RECESSION DU DEBIT POUR LA COLONNE 8	262
ANNEXE 29: IMPACT DE L'EPAISSEUR DES BILLES DE VERRE SUR LA FORME DE LA COURBE DE PERCEE	263

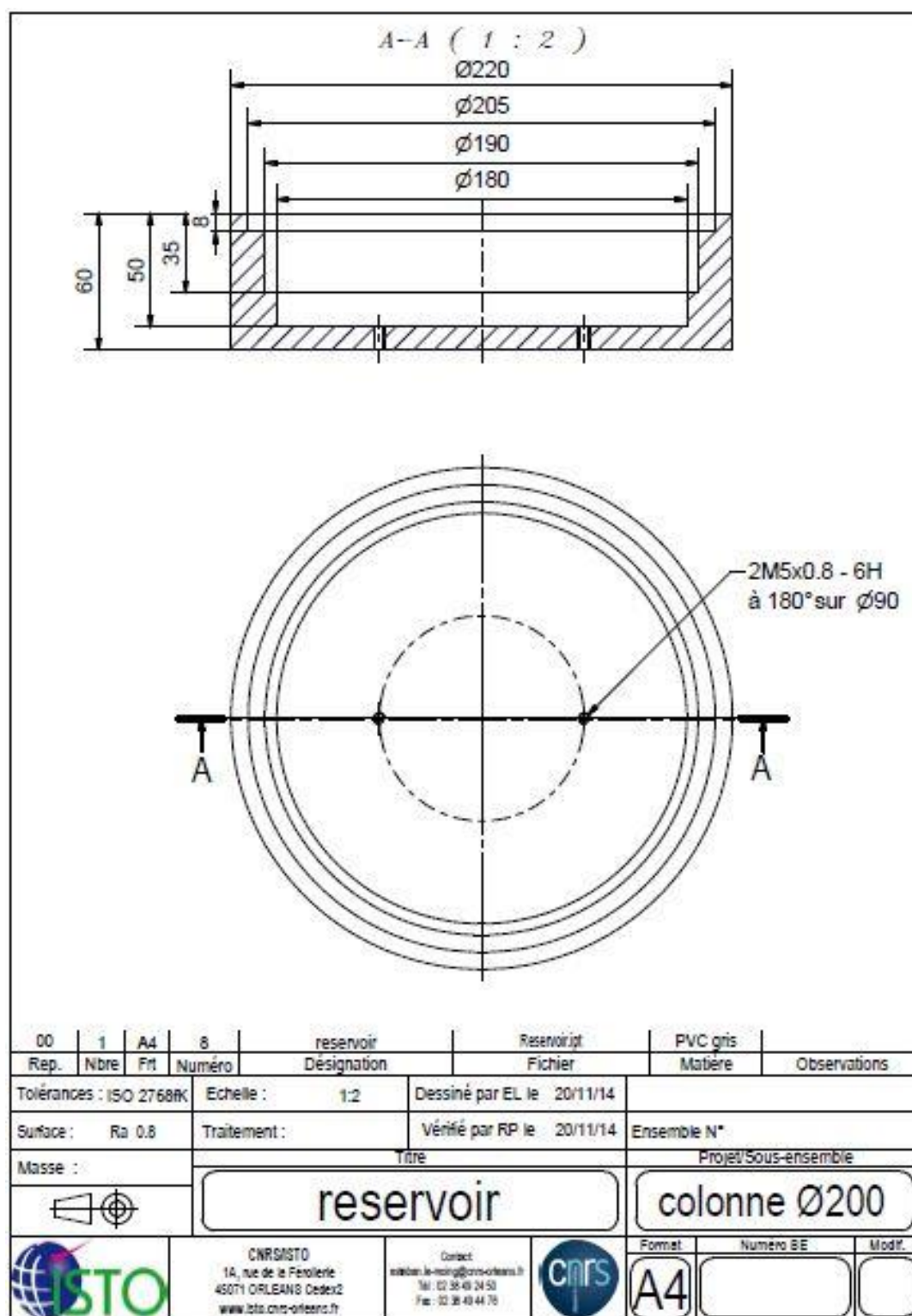
6.1 Annexes du chapitre 2



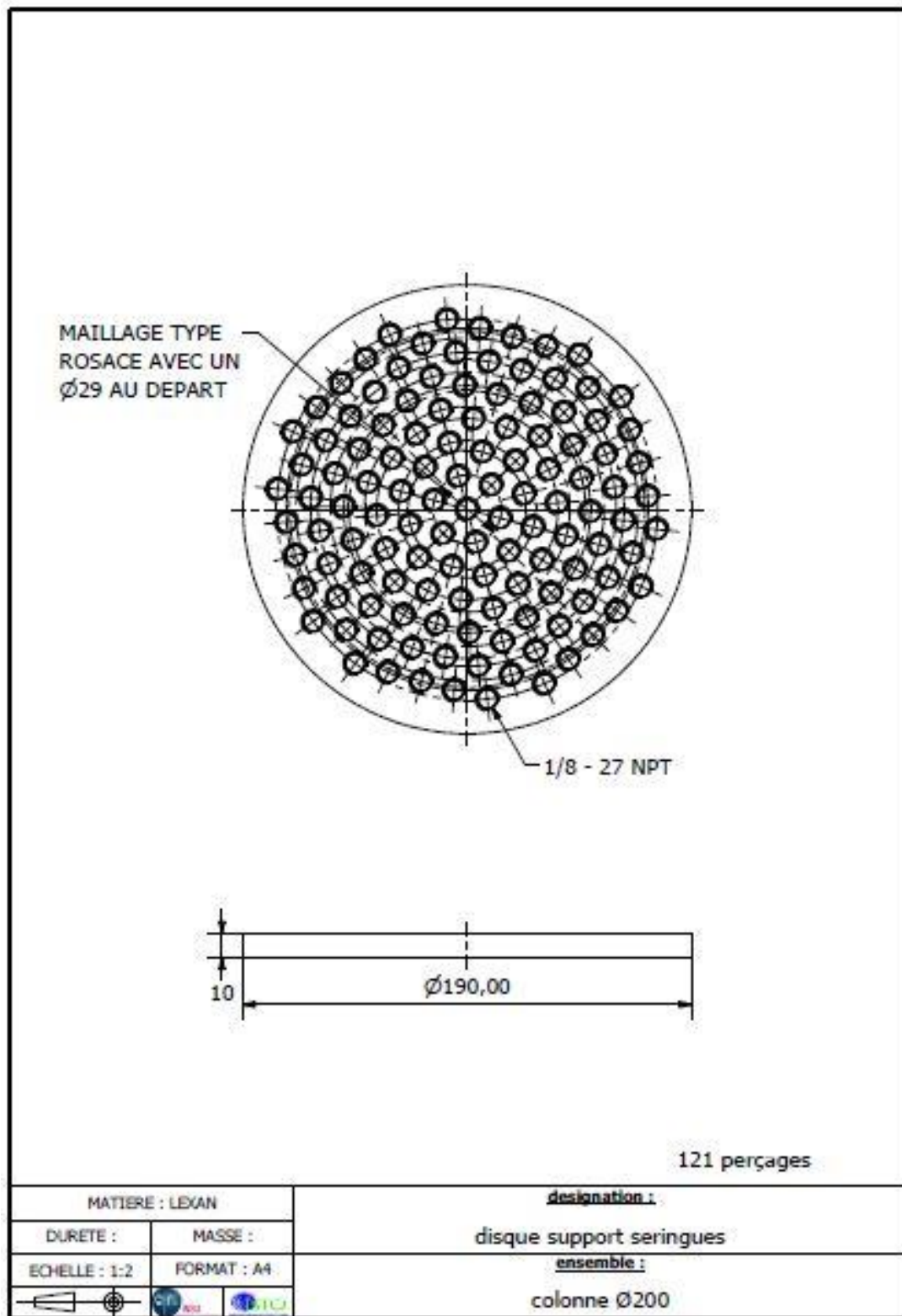
Annexe 1: Schéma de principe du préleveur manuel inspiré du pénétromètre dynamique.

Annexe 2: Plan pour
l'ensemble du montage
en laboratoire

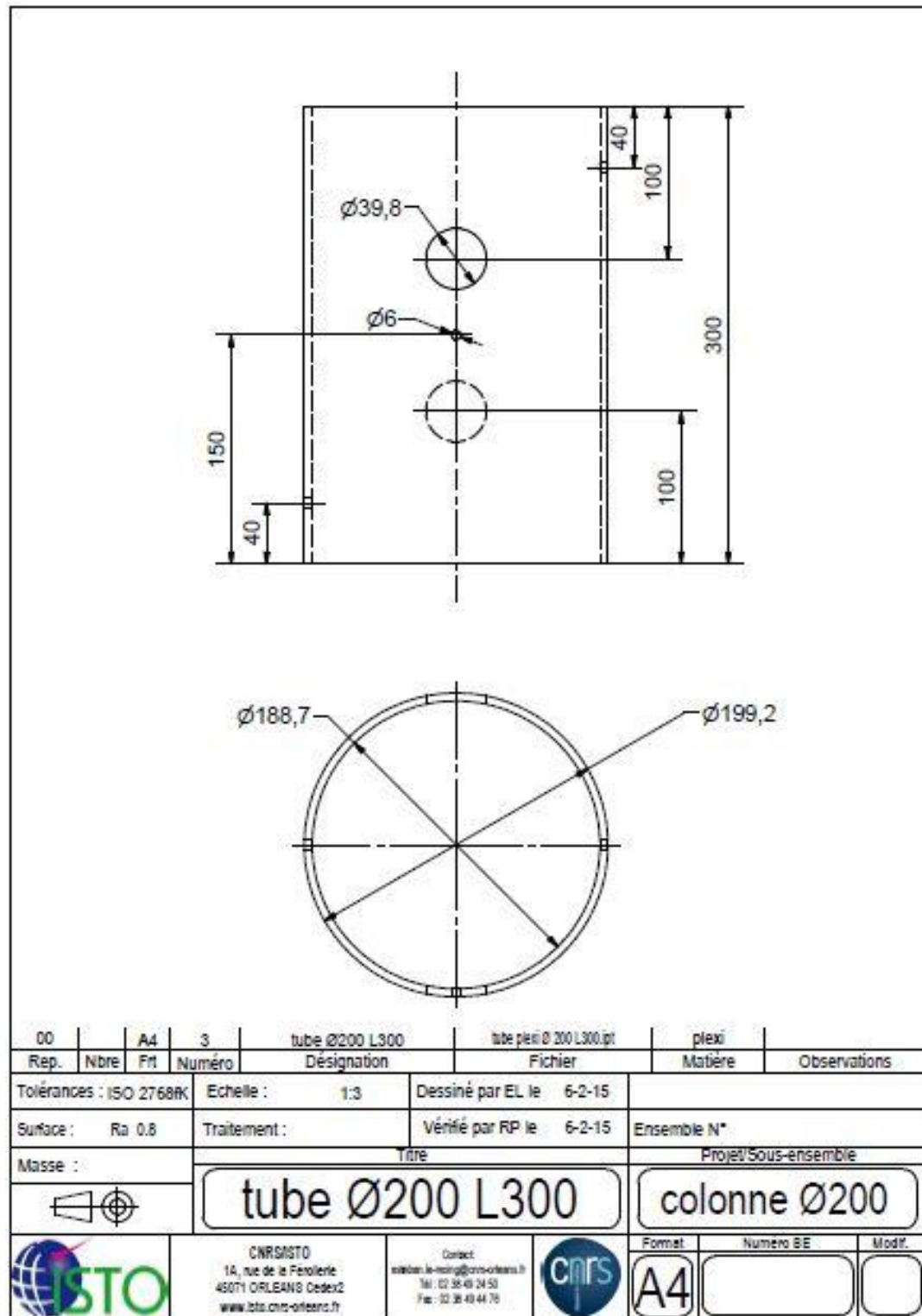




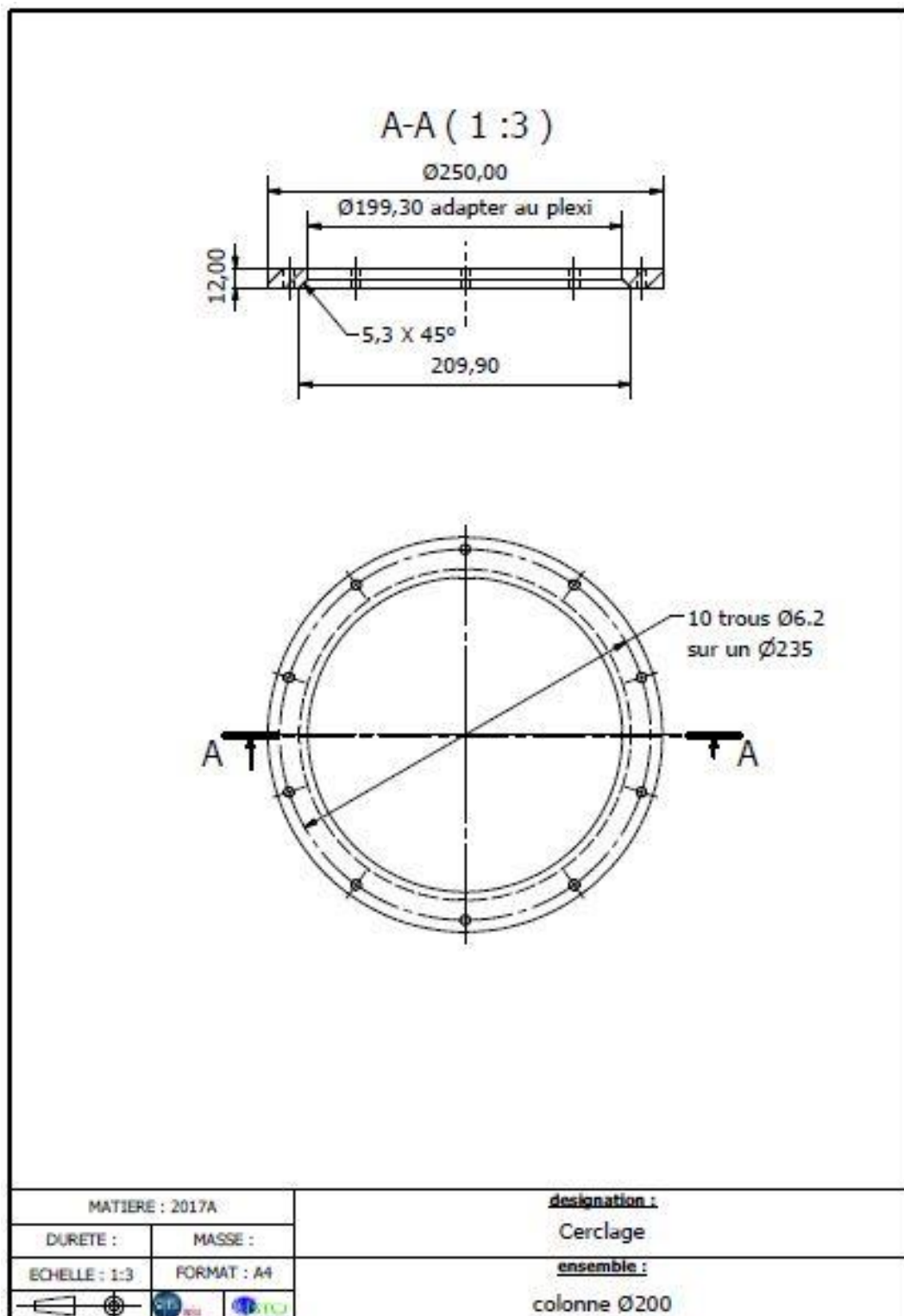
Annexe 3: Plan du reservoir du simulateur de pluie



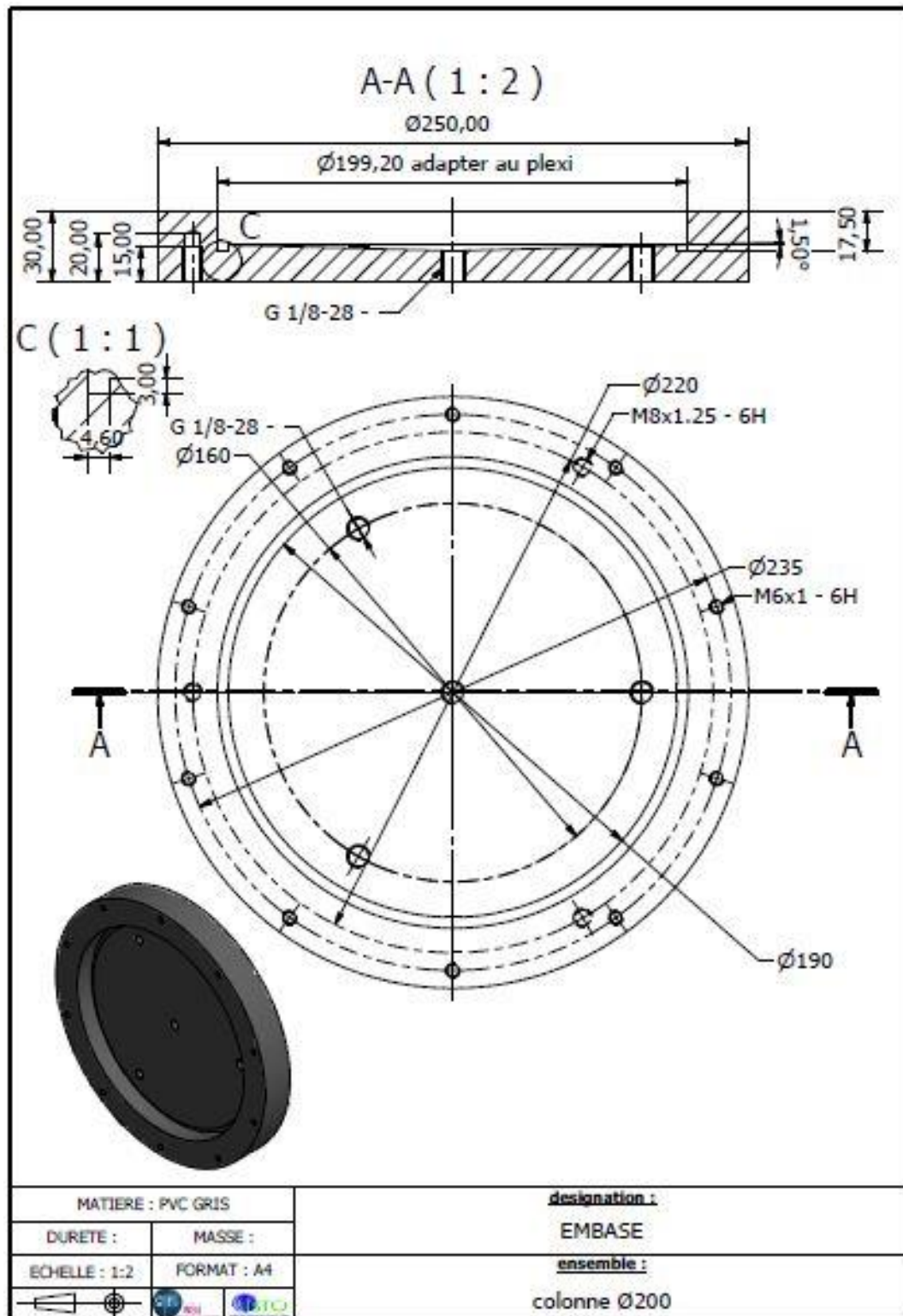
Annexe 4: Plan du maillage hexagonal pour une distribution homogène.



Annexe 5: Plan du cylindre en plexiglass.

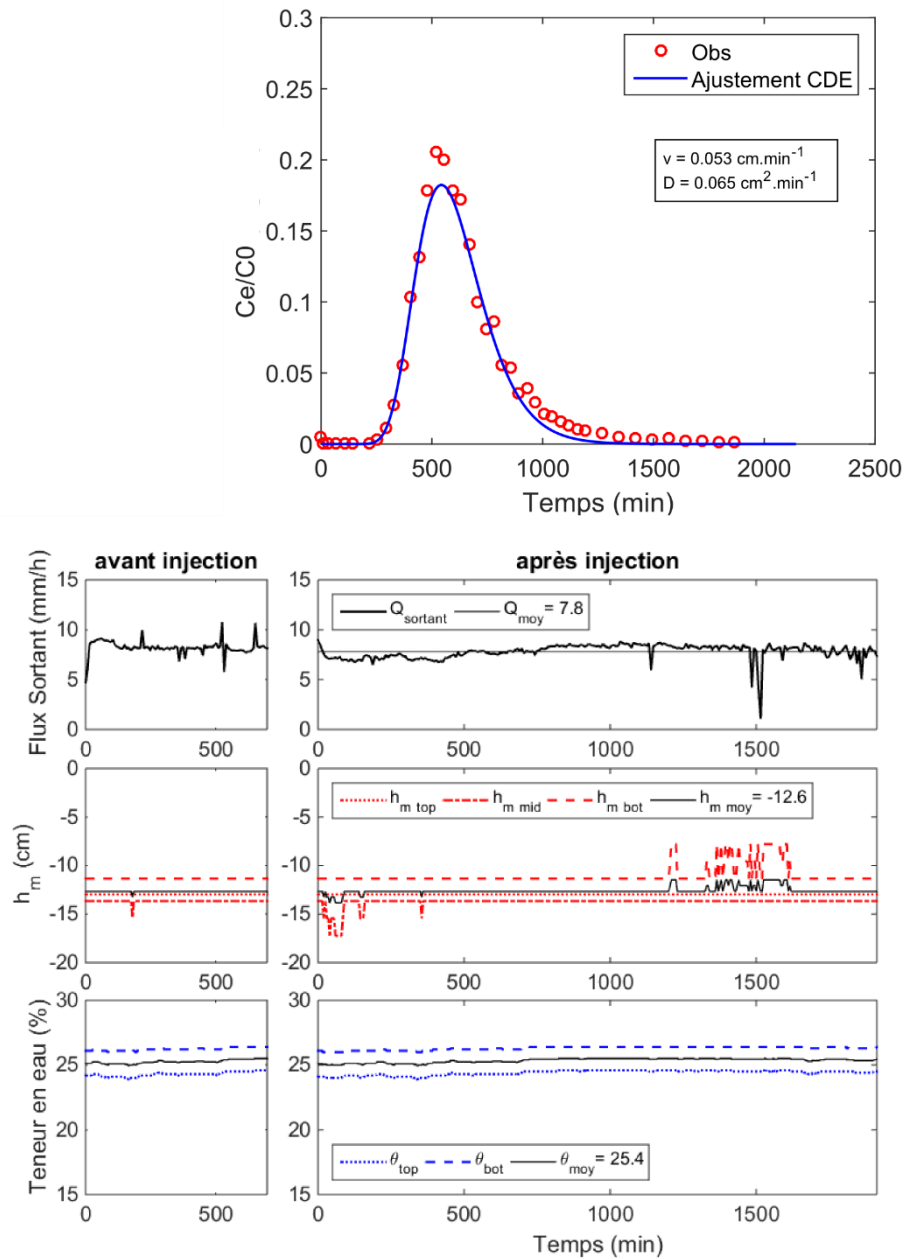


Annexe 6: Plan cerclage en aluminium.

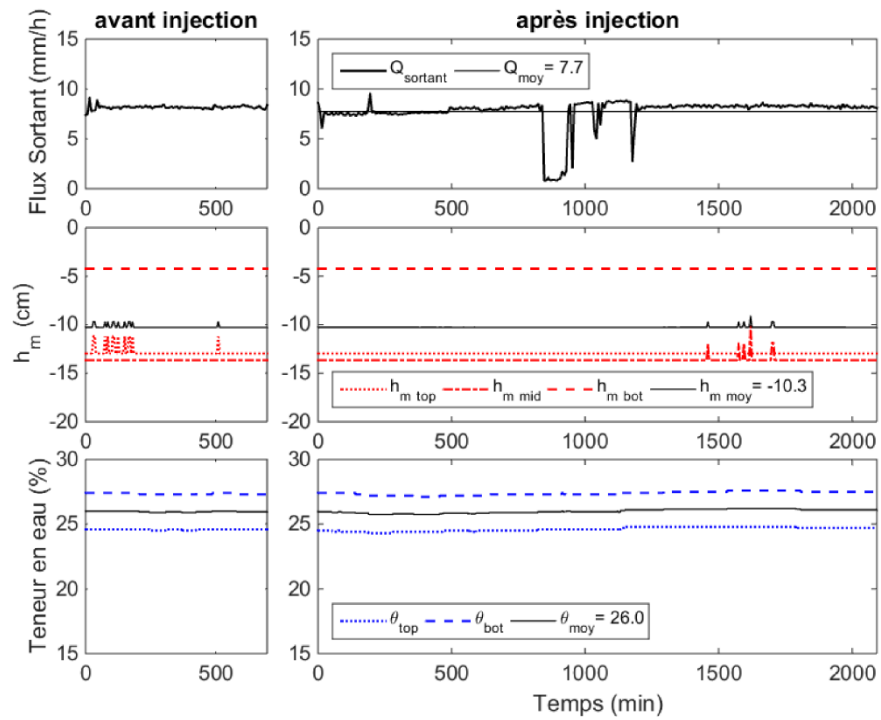
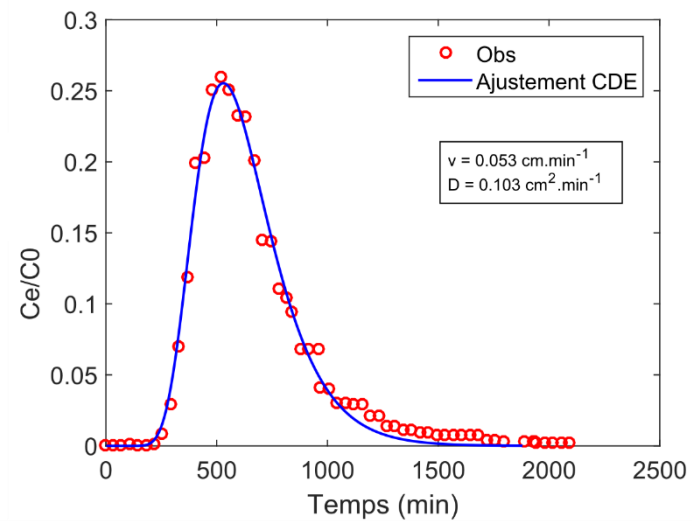


Annexe 7: Plan de l'embase du dispositif d'élution sur colonne

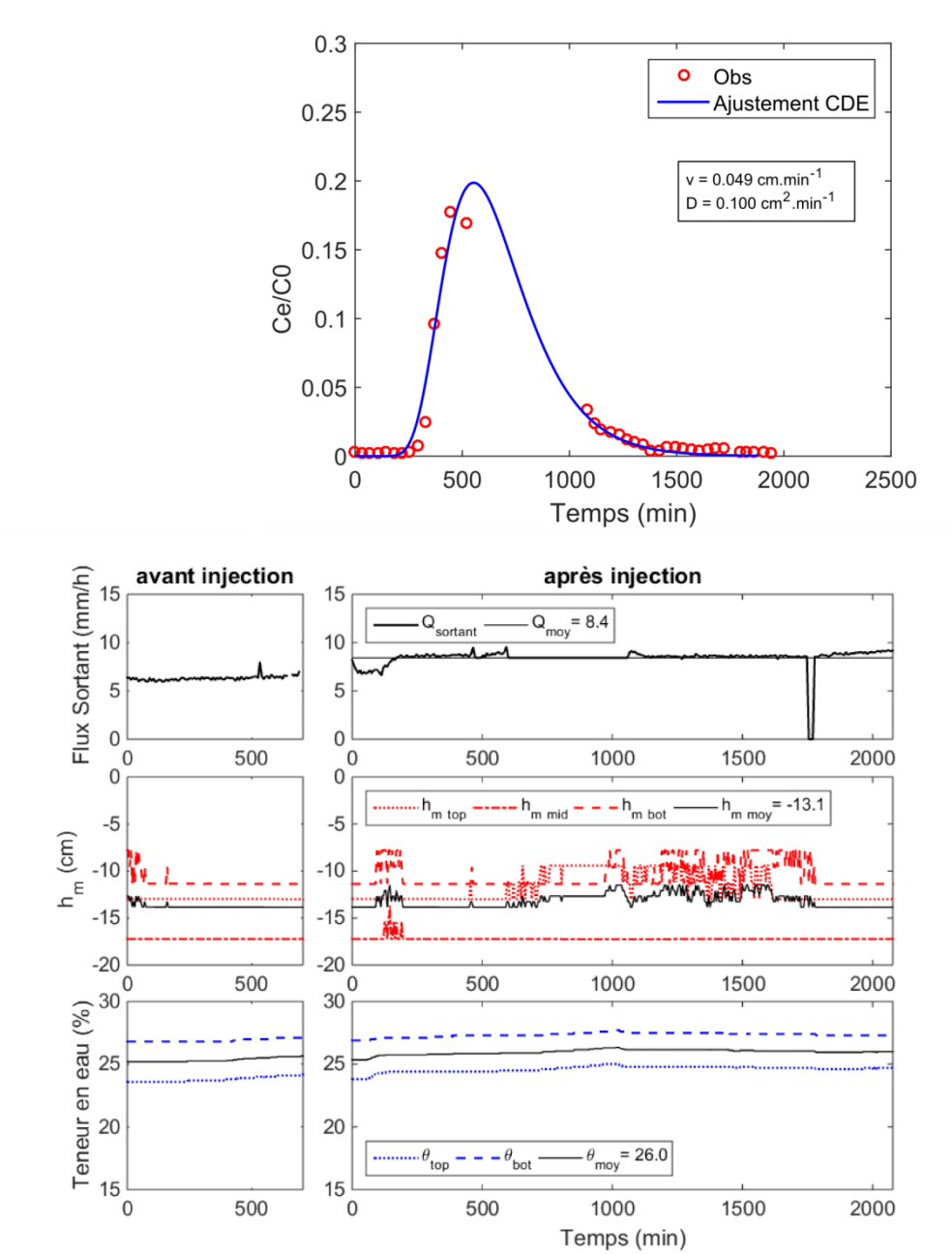
6.2 Annexes du chapitre 3



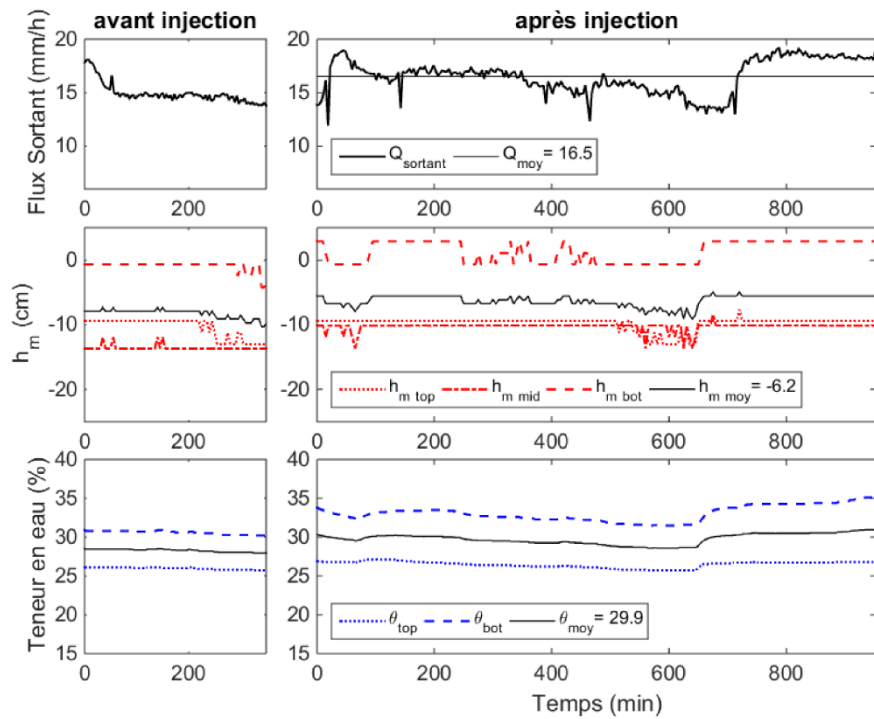
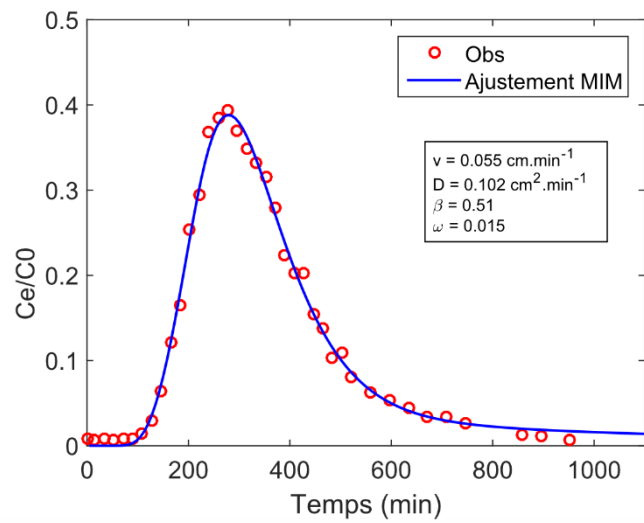
Annexe 8: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°4 sur la colonne 6 à intensité moyenne de précipitation (8 mm/h) en régime permanent (Col6PER4).



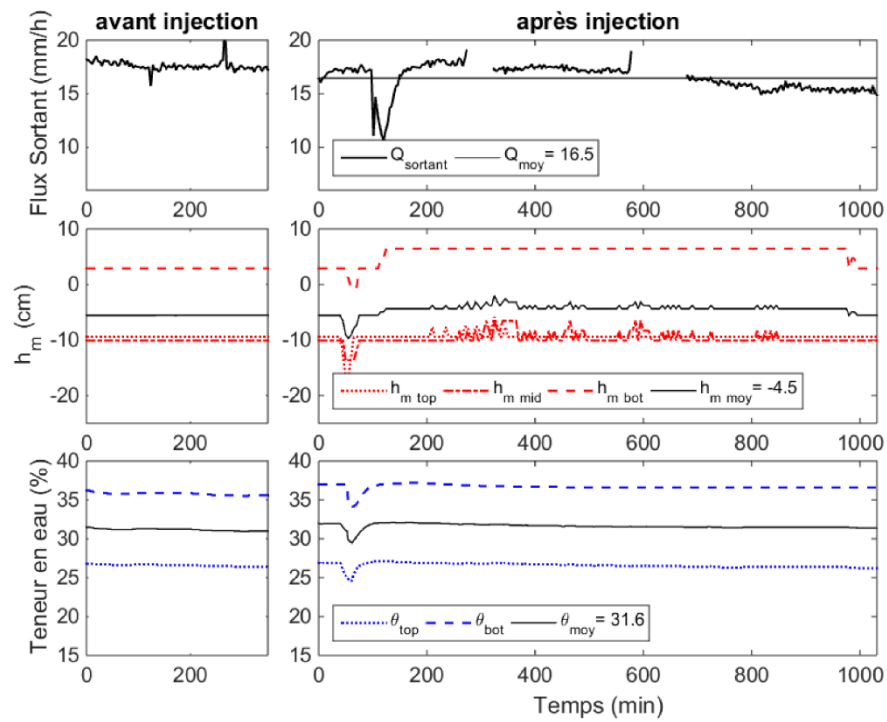
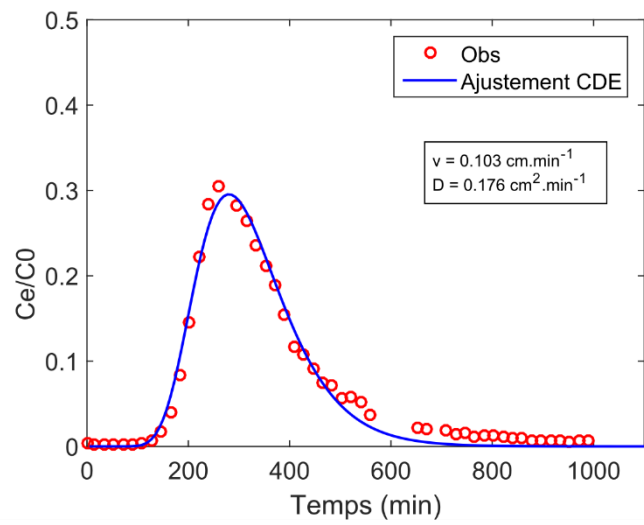
Annexe 9: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°5 sur la colonne 6 à intensité moyenne de précipitation (8 mm/h) en régime permanent (Col6PER5).



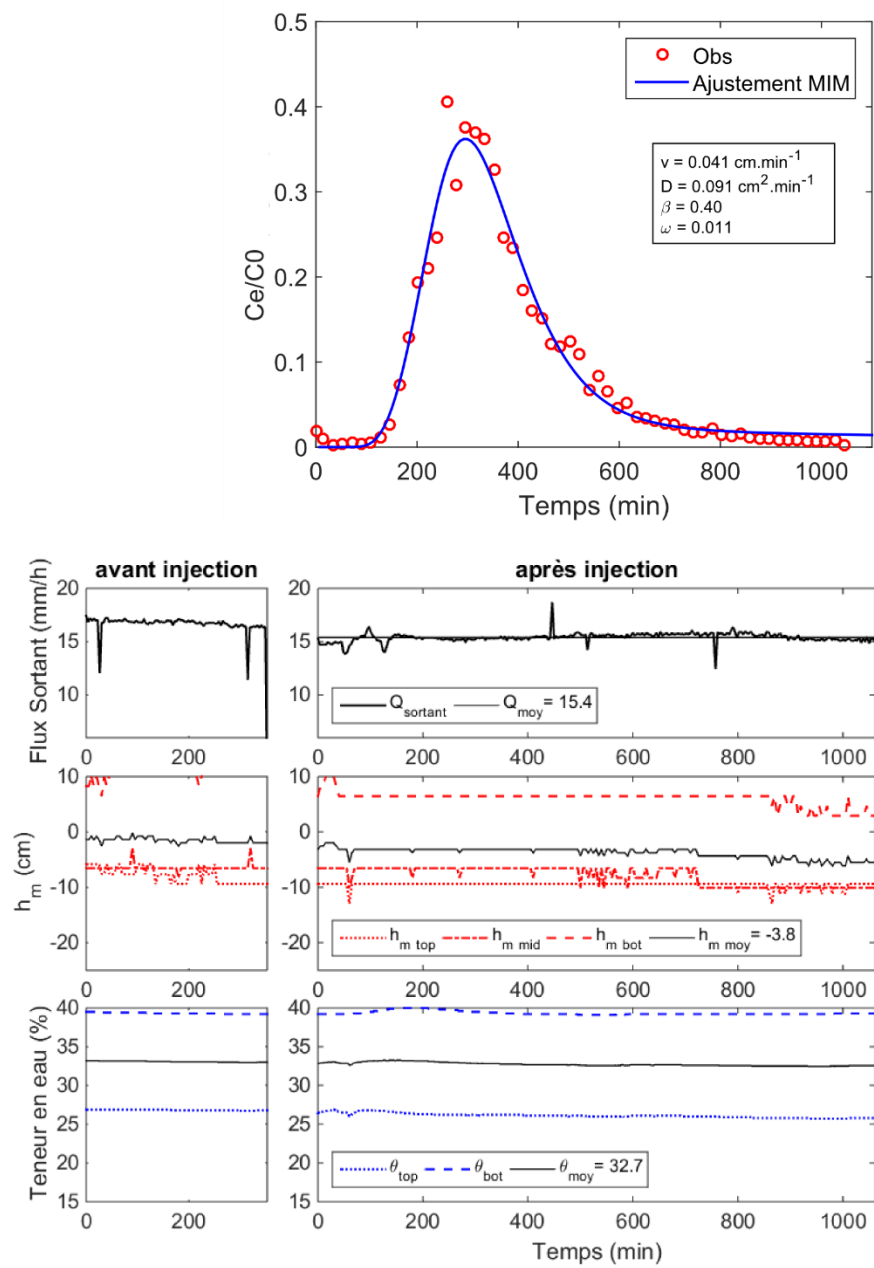
Annexe 10: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°6 sur la colonne 6 à intensité moyenne de précipitation (8 mm/h) en régime permanent (Col6PER6).



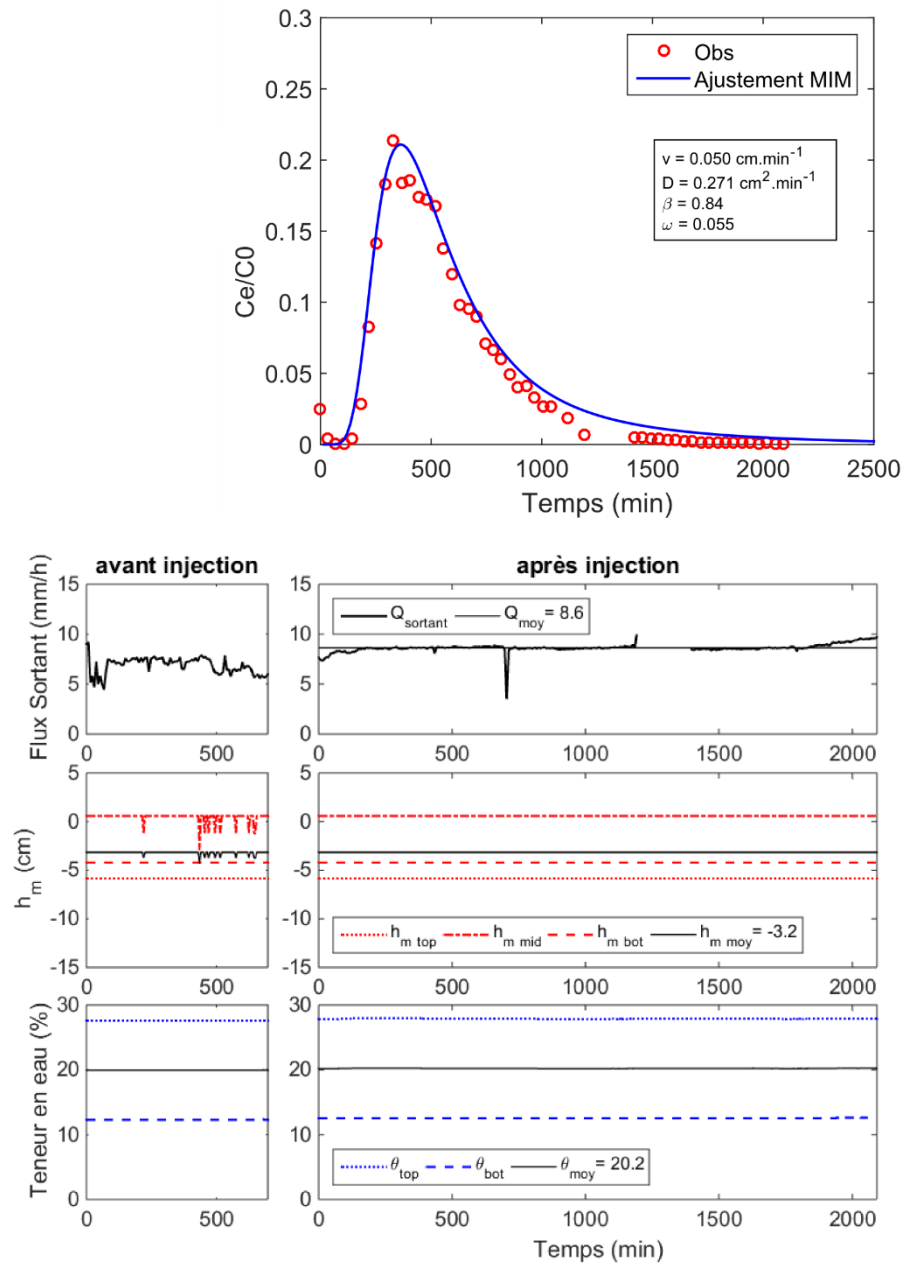
Annexe 11: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'éluion n°7 sur la colonne 6 à forte intensité de précipitation (16 mm/h) en régime permanent (Col6PER7).



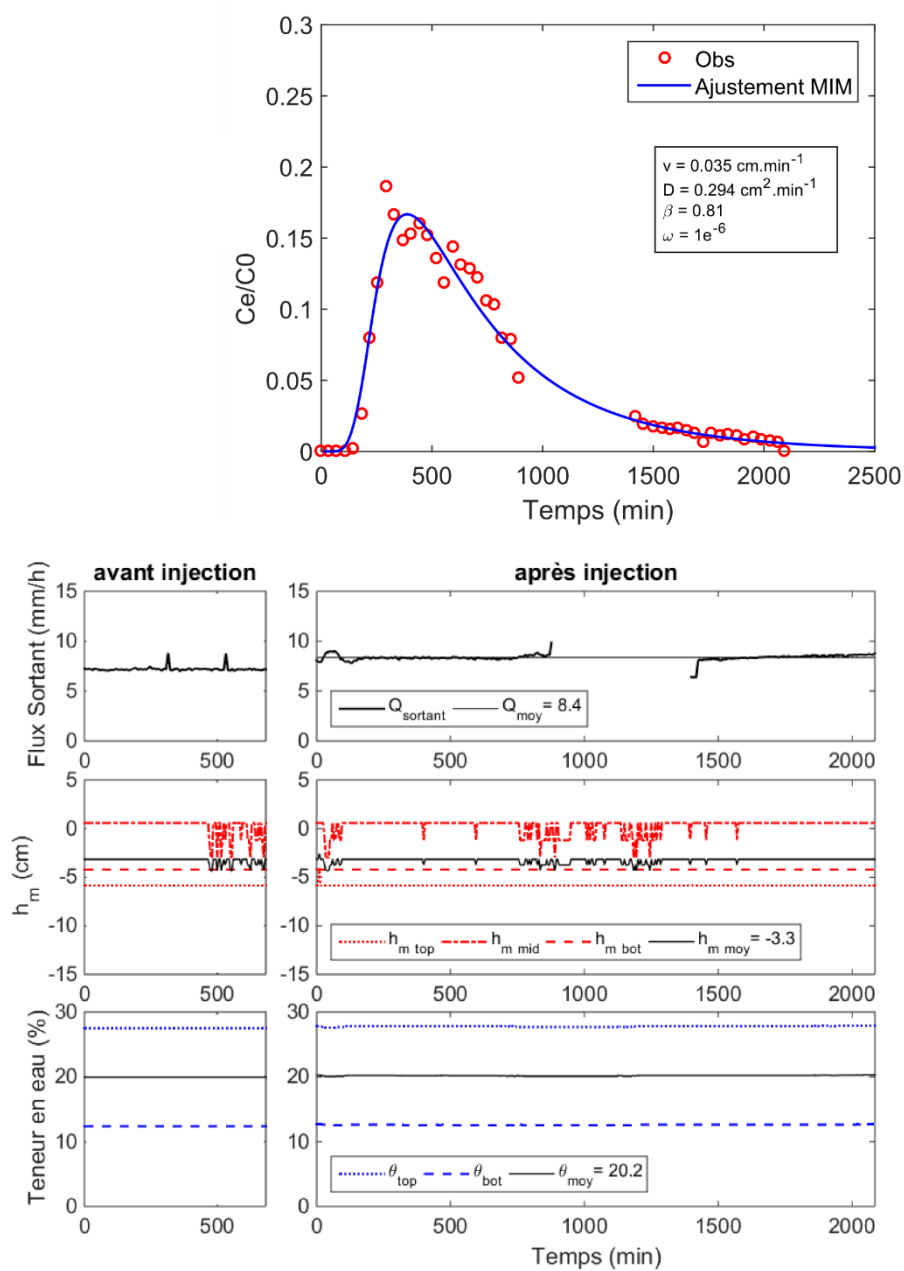
Annexe 12: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°8 sur la colonne 6 à forte intensité de précipitation (16 mm/h) en régime permanent (Col6PER8)



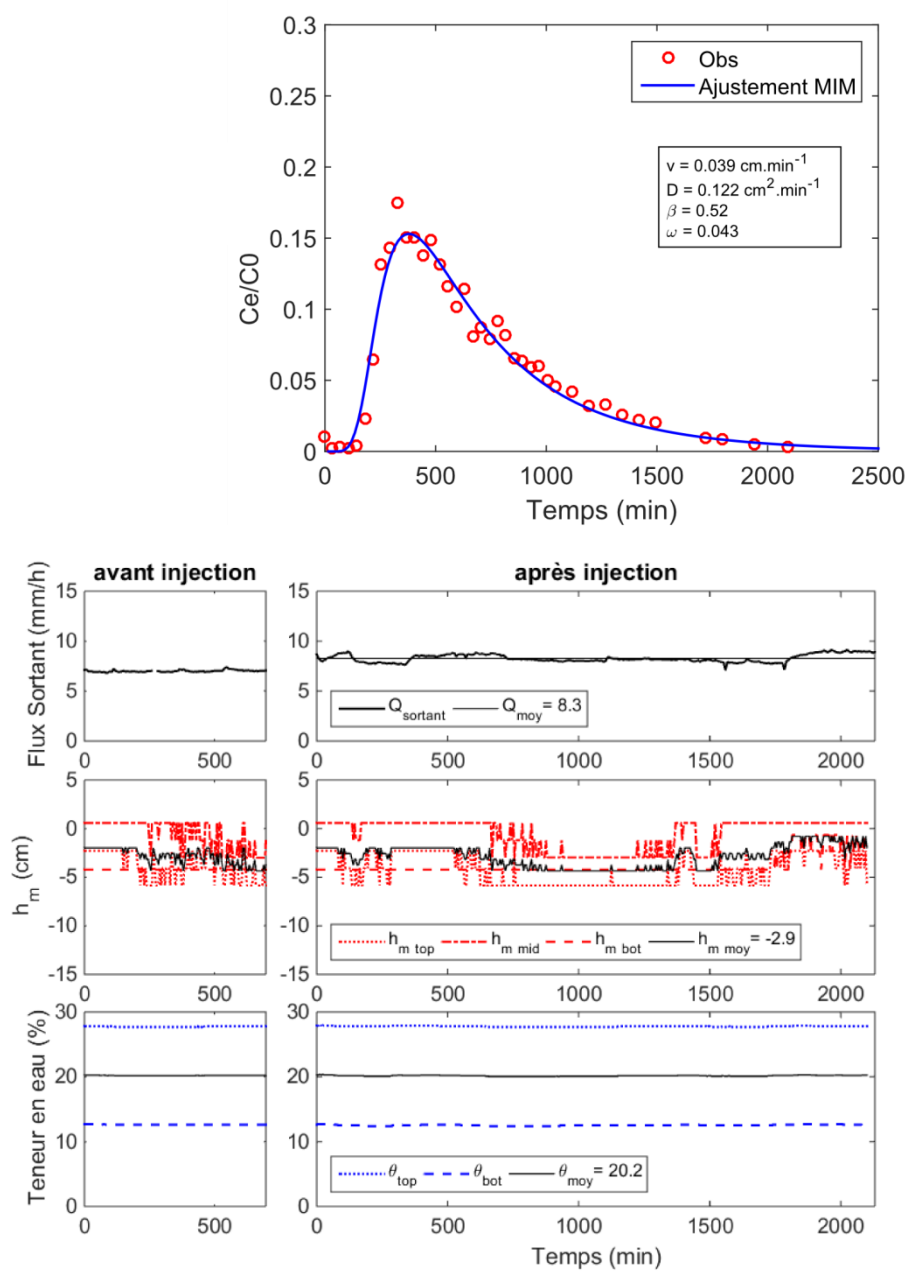
Annexe 13: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°9 sur la colonne 6 à forte intensité de précipitation (16 mm/h) en régime permanent (Col6PER9).



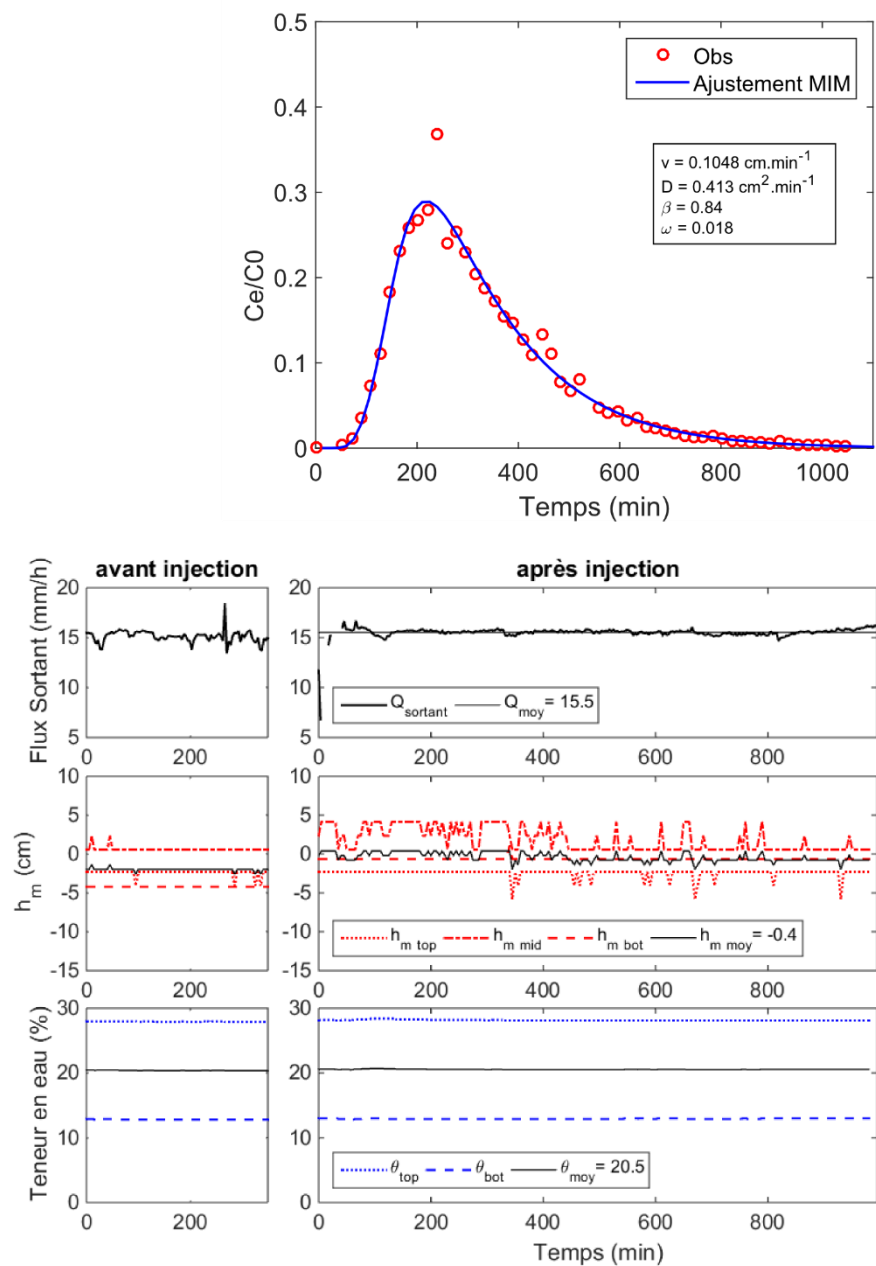
Annexe 14: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°4 sur la colonne 8 à intensité moyenne de précipitation (8 mm/h) en régime permanent (Col8PER4).



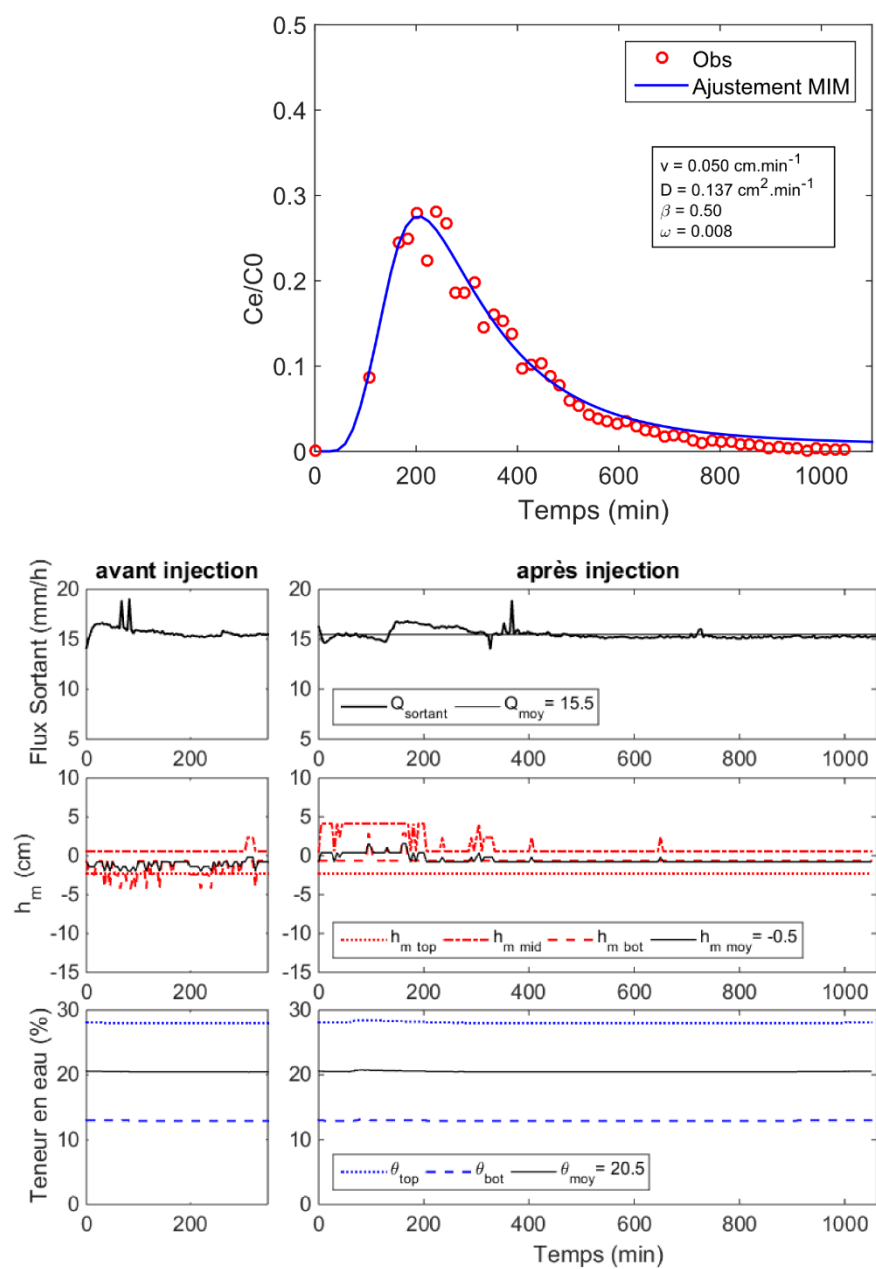
Annexe 15: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°5 sur la colonne 8 à intensité moyenne de précipitation (8 mm/h) en régime permanent (Col8PER5).



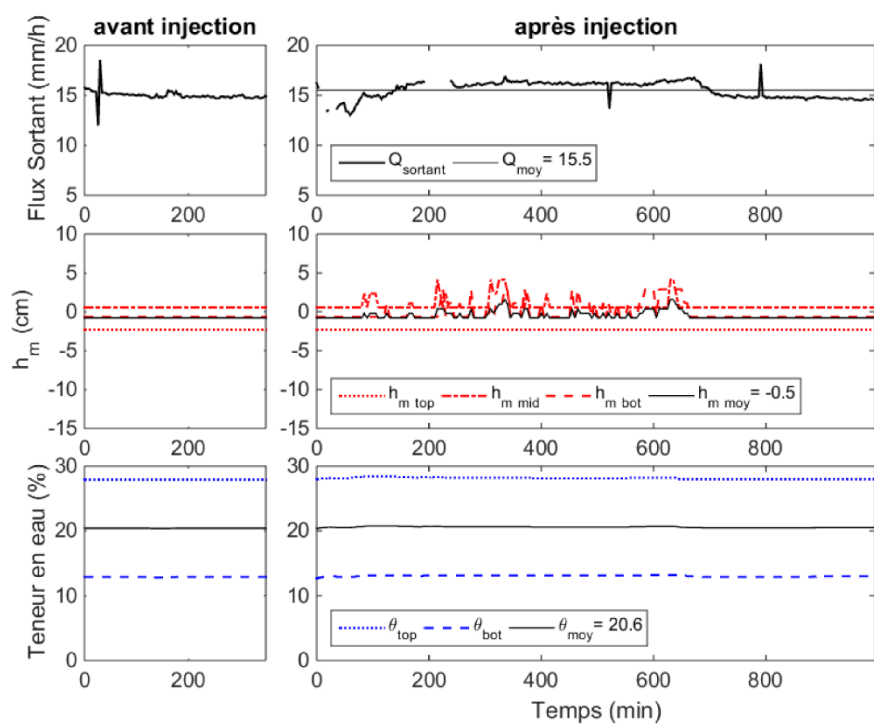
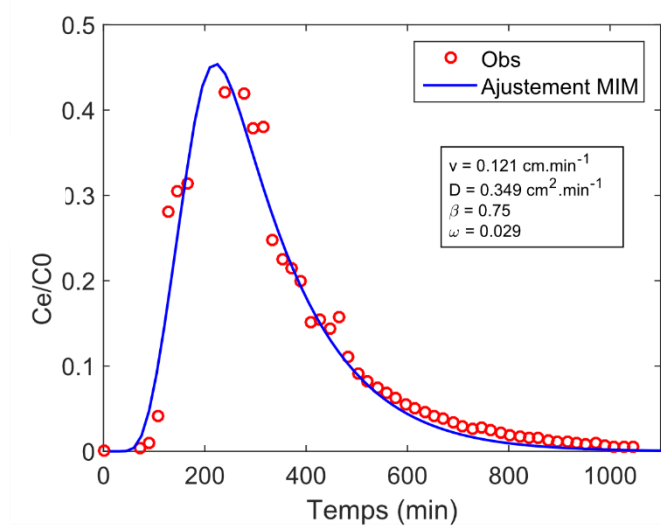
Annexe 16: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°6 sur la colonne 8 à intensité moyenne de précipitation (8 mm/h) en régime permanent (Col8PER6).



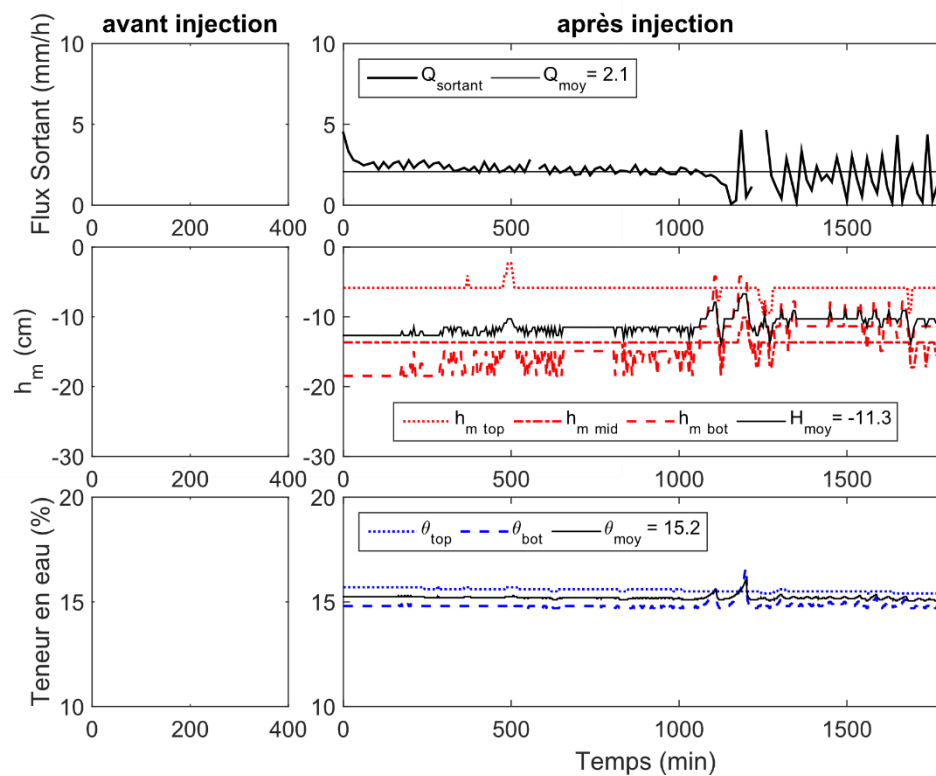
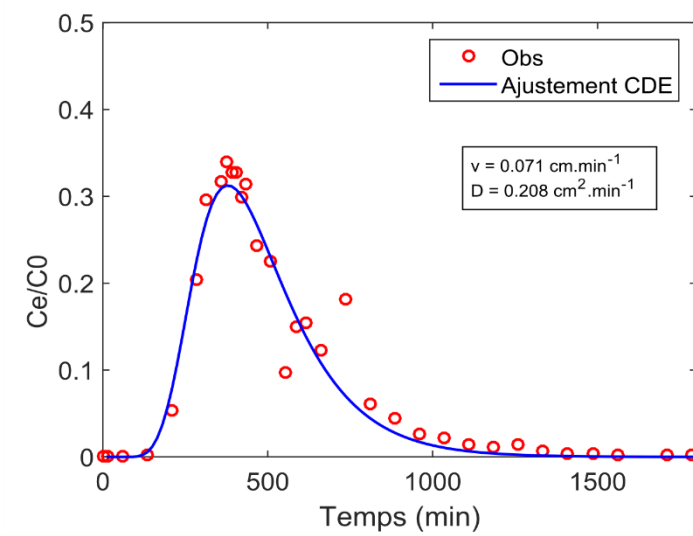
Annexe 17: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'éluion n°7 sur la colonne 8 à forte intensité de précipitation (16 mm/h) en régime permanent (Col8PER7).



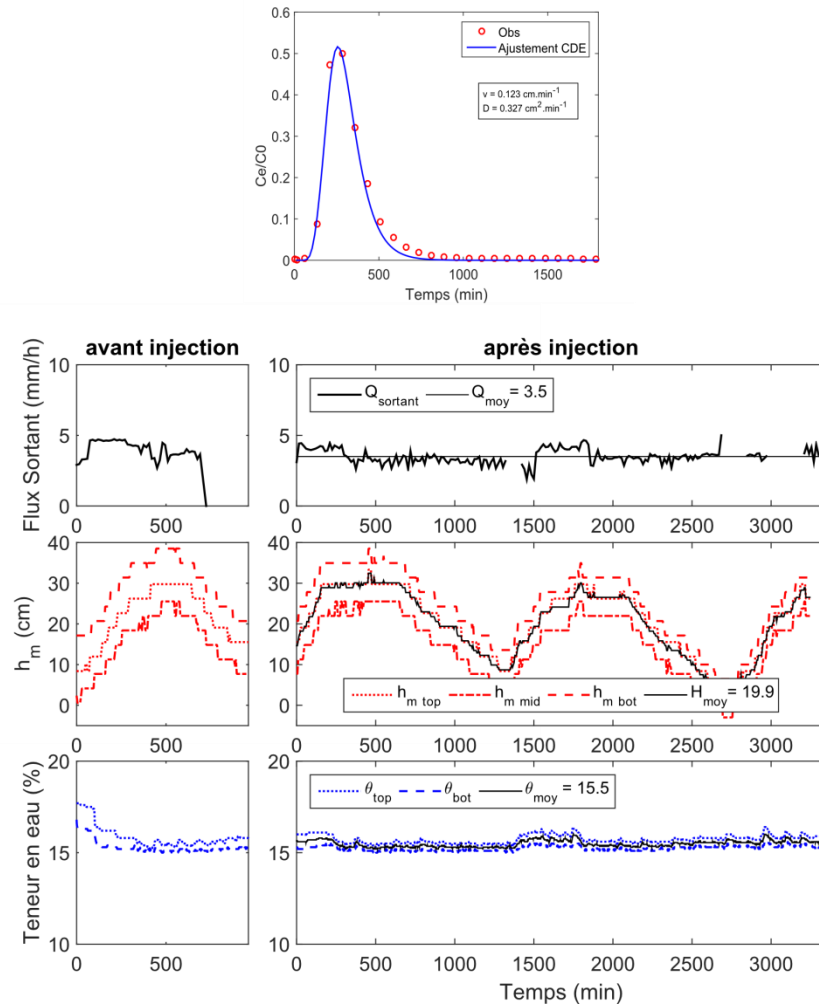
Annexe 18: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°8 sur la colonne 8 à forte intensité de précipitation (16 mm/h) en régime permanent (Col8PER8).



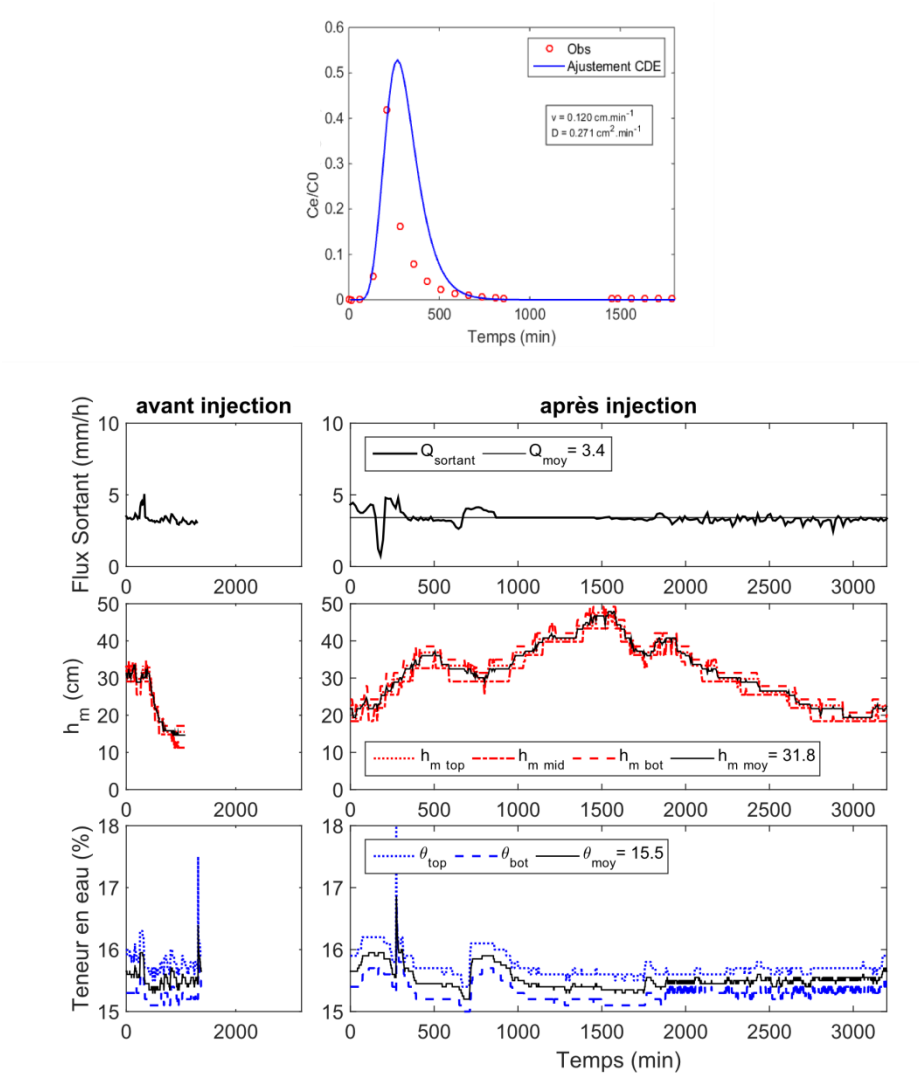
Annexe 19: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°9 sur la colonne 8 à forte intensité de précipitation (16 mm/h) en régime permanent (Col8PER9).



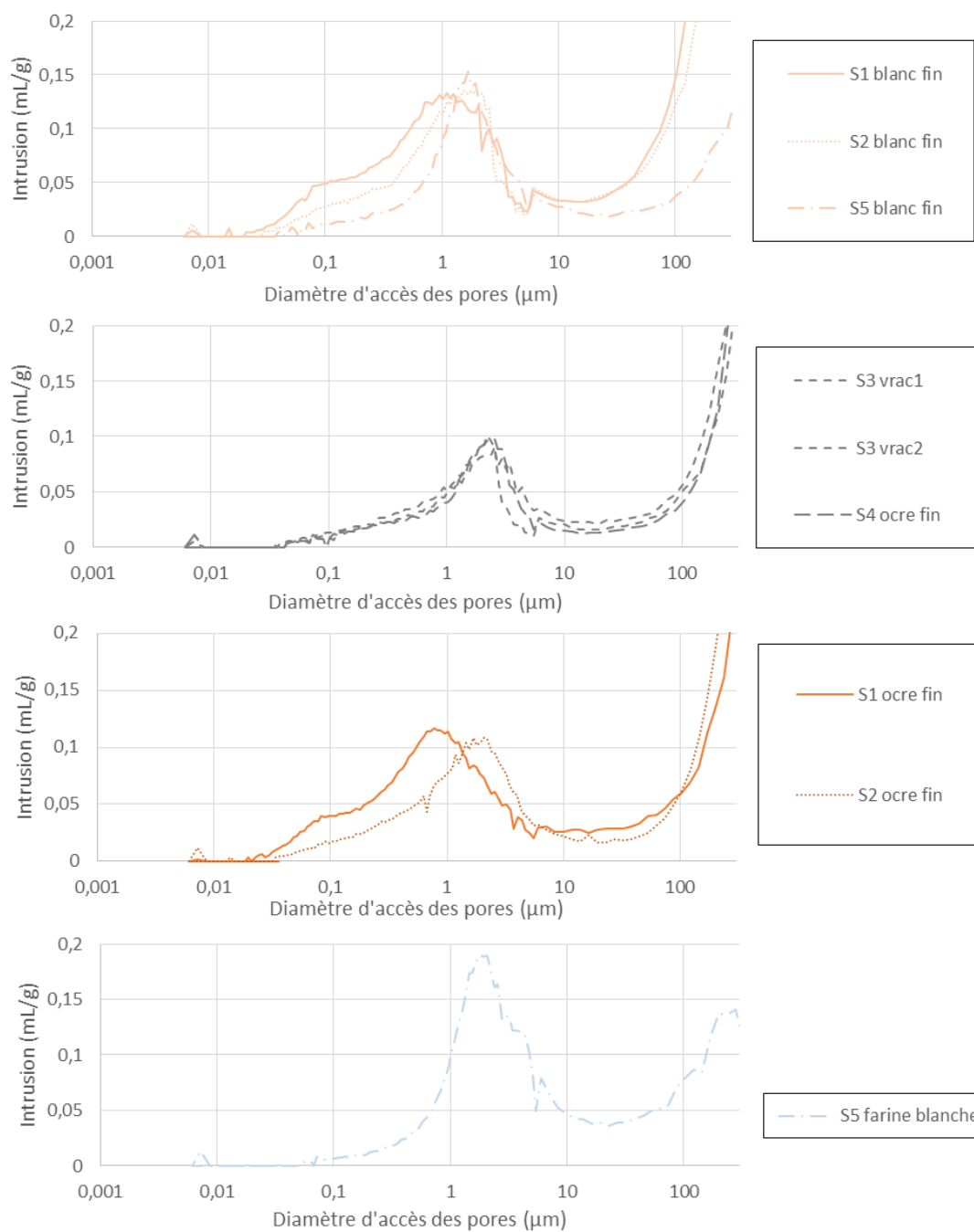
Annexe 20: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°1 sur la colonne 3 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col3PER1).



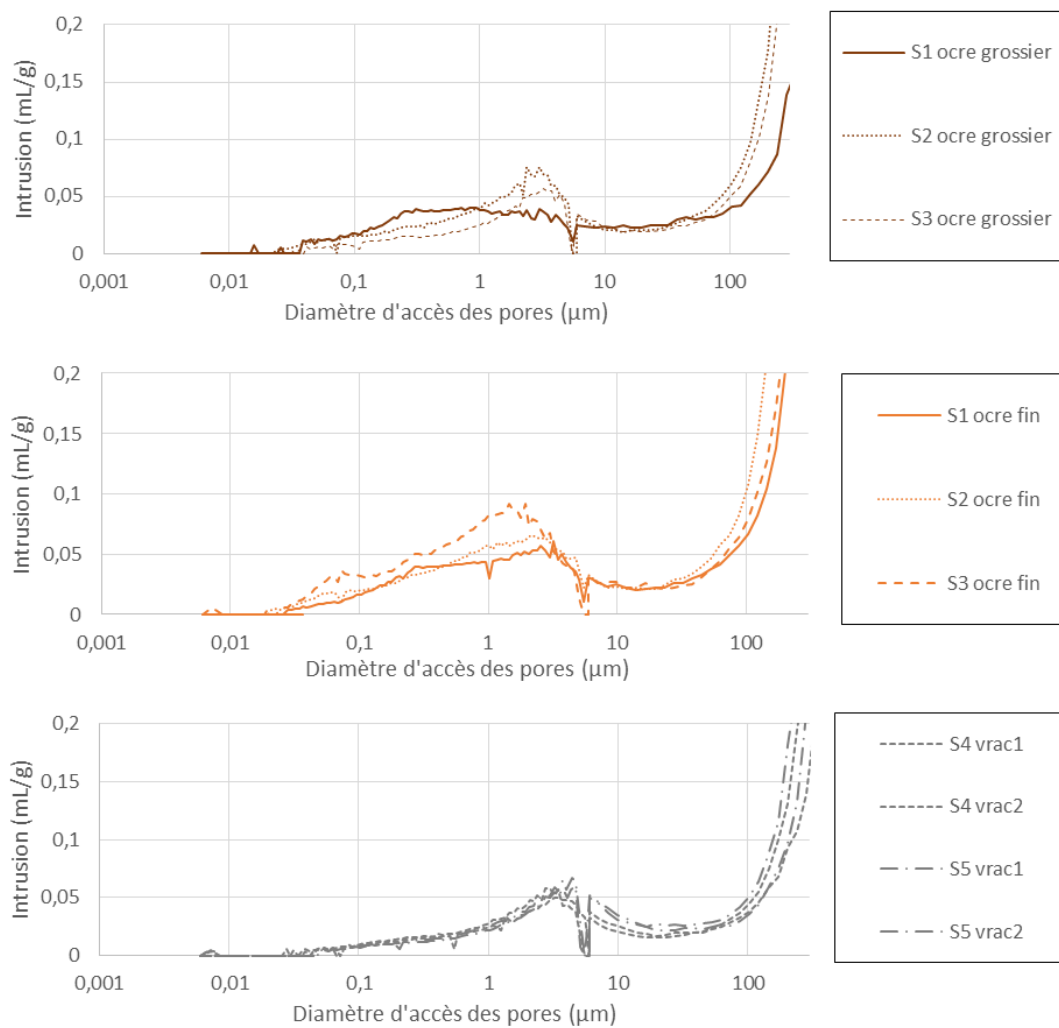
Annexe 21: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°2 sur la colonne 3 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col3PER2).



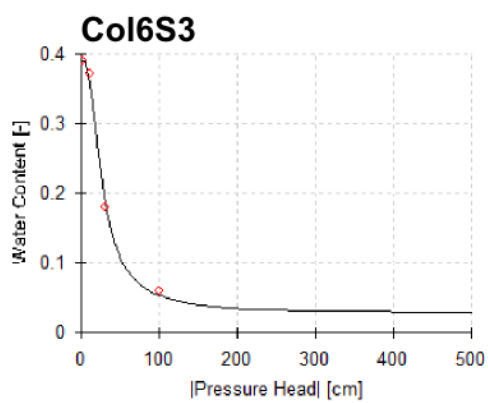
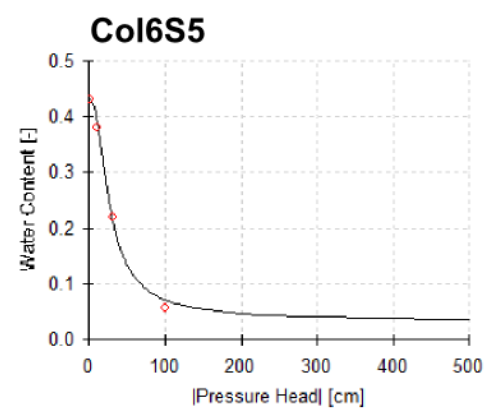
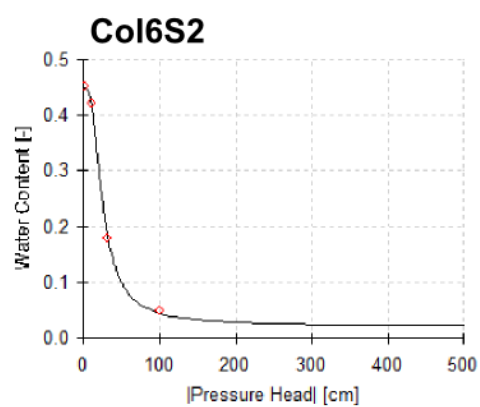
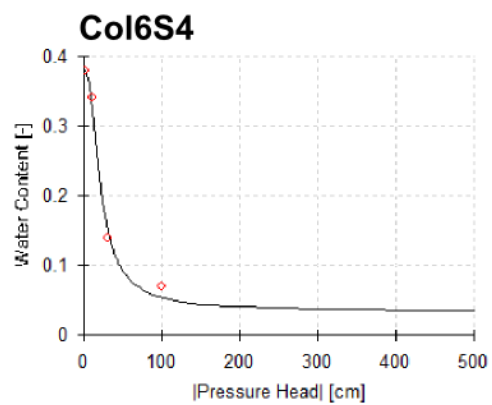
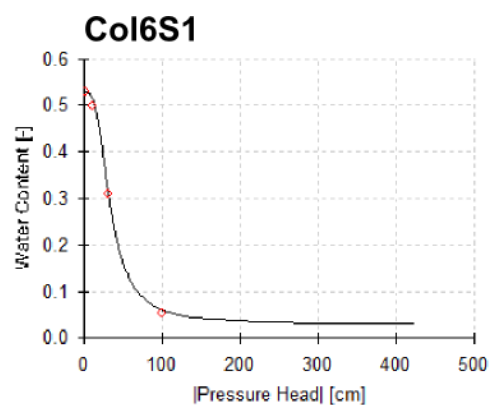
Annexe 22: Courbe de percée ajustée d'après une équation de convection-dispersion classique (en haut) et suivis du débit, du potentiel matriciel et de la teneur en eau (en bas) pour l'expérience d'élution n°3 sur la colonne 3 à faible intensité de précipitation (4 mm/h) en régime permanent (Col3PER3).



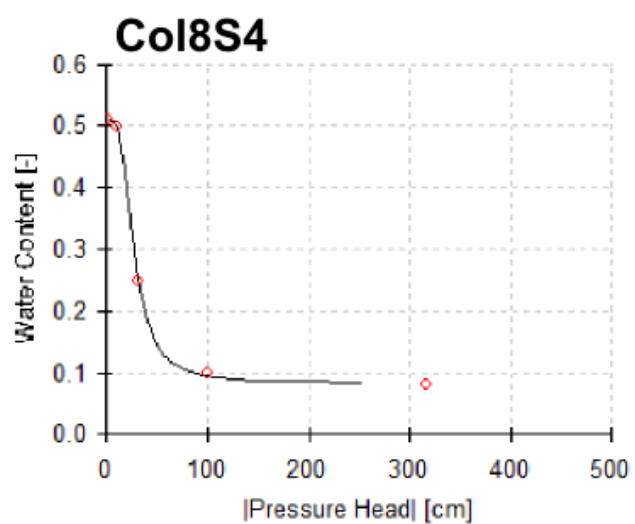
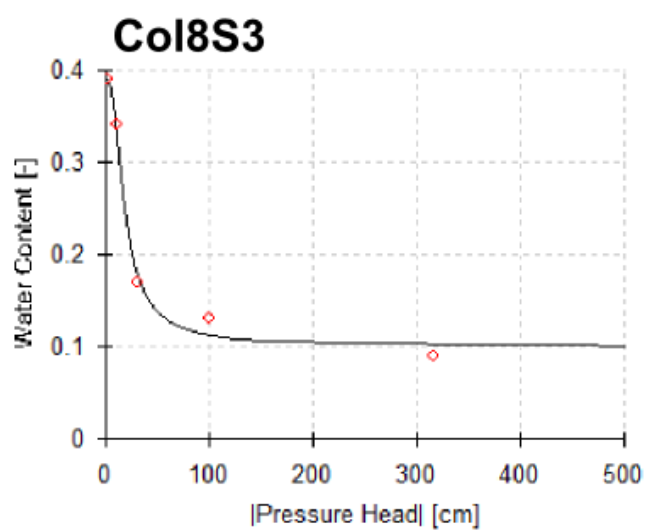
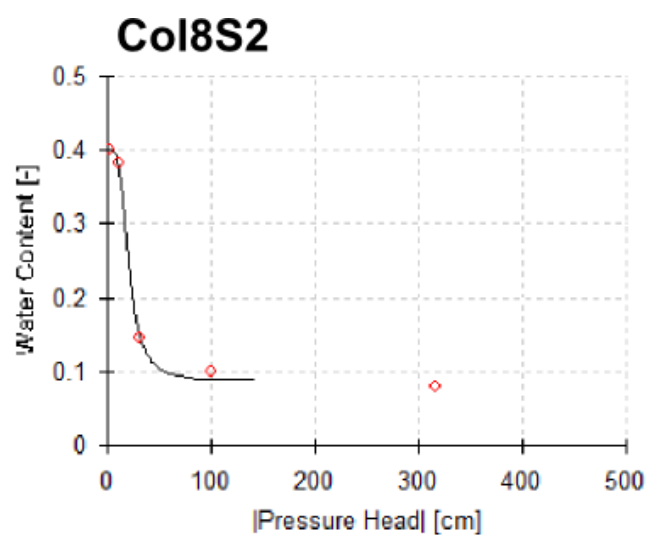
Annexe 23: Distribution de la taille des pores de la colonne 6



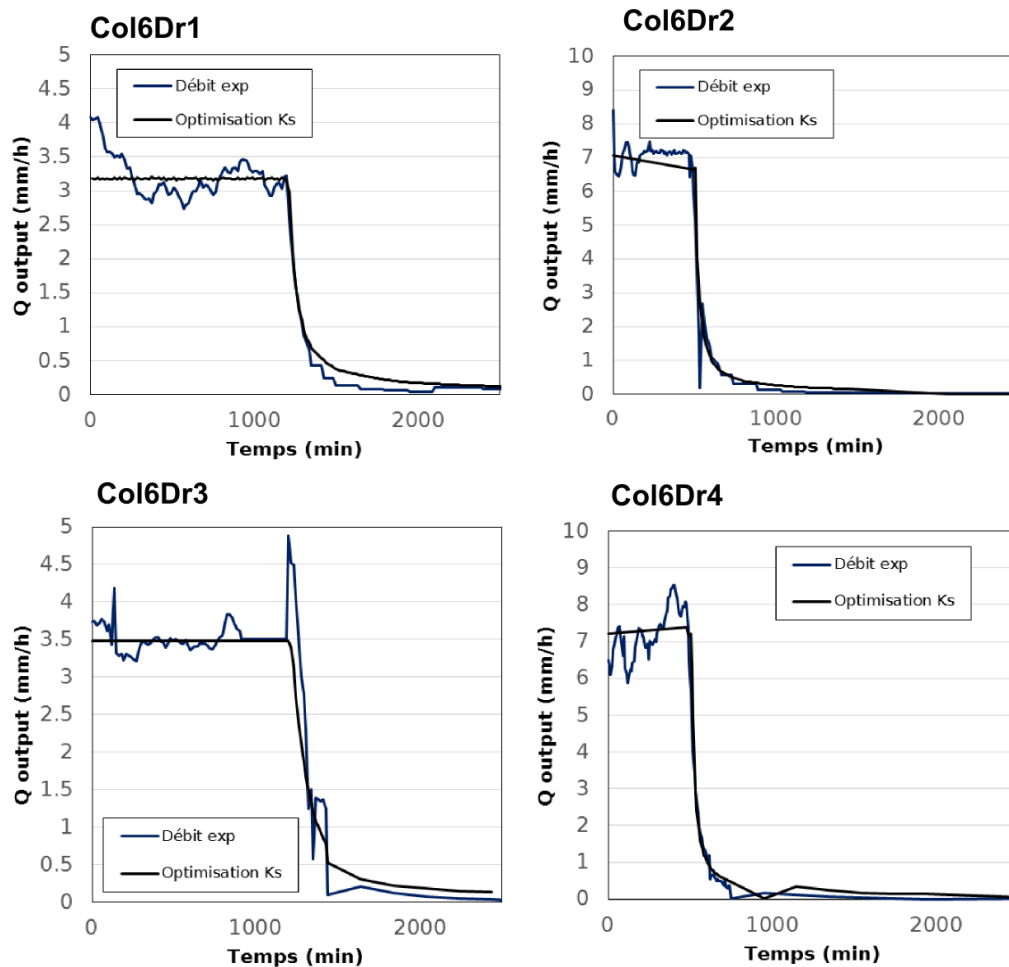
Annexe 24: Distribution de la taille des pores de la colonne 8



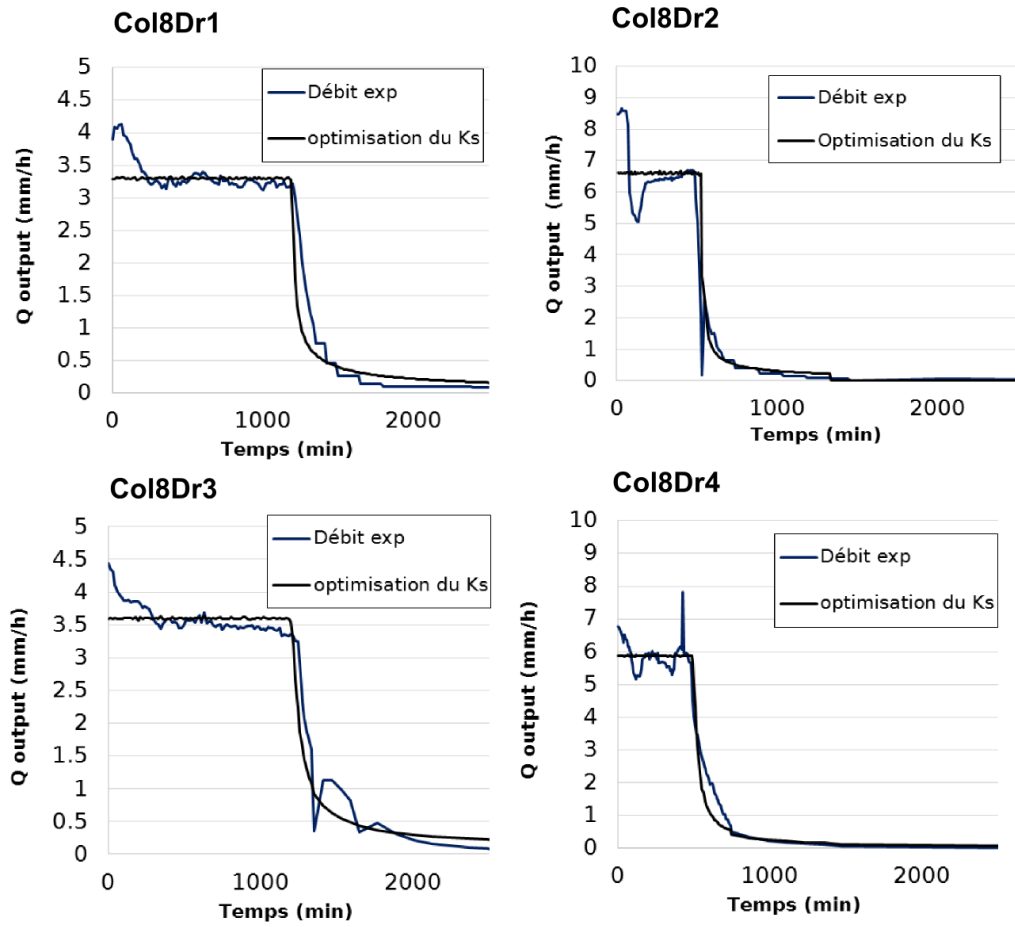
Annexe 25: Courbes de rétention et ajustement RETC de la colonne 6



Annexe 26: Courbes de rétention et ajustement RETC de la colonne 8



Annexe 27: Courbe de recession du debit de la colonne 6

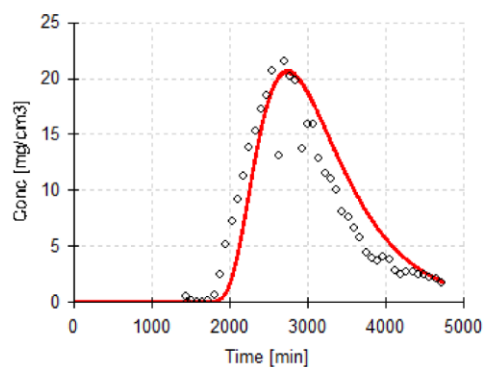


Annexe 28: Courbe de recession du debit pour la colonne 8

Avec les paramètres de l'ajustement (1)

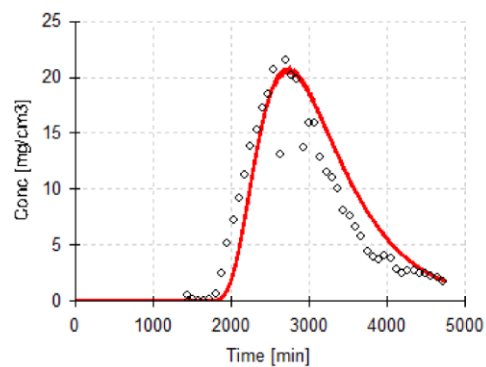
Avec lit de billes de verre (épaisseur de 2 cm)

Col8PER3



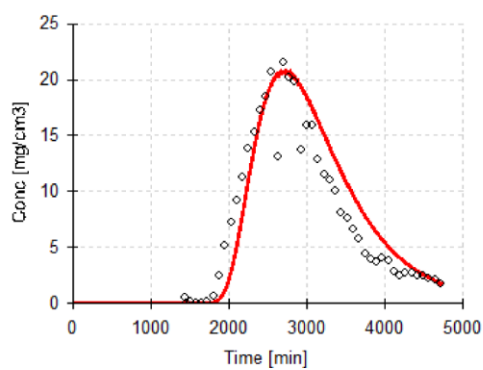
Avec lit de billes de verre (épaisseur de 1,5 cm)

Col8PER3



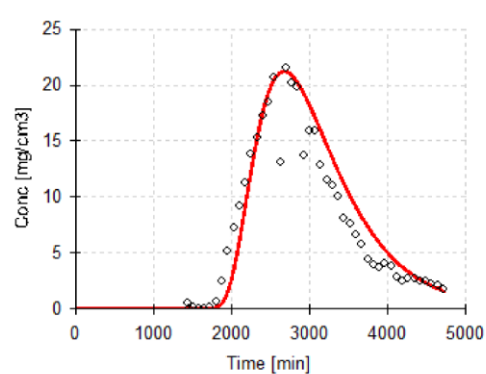
Avec lit de billes de verre (épaisseur de 1,0 cm)

Col8PER3



Avec lit de billes de verre (épaisseur de 0,5 cm)

Col8PER3



○ suivi concentration
— Courbe de percée simulée

Annexe 29: Impact de l'épaisseur des billes de verre sur la forme de la courbe de percée

[Emélie Viel]

[Etude des processus de transport des solutés hors équilibre physique. Application à zone non saturée des Calcaires de Beauce]

L'objectif de ce travail est d'étudier les phénomènes de transport des solutés hors équilibre physique dans la ZNS des Calcaires de Beauce. Cette étude a été réalisée en deux parties, une partie laboratoire qui a consisté en la réalisation d'expériences d'éluion sur colonnes non perturbées en régime permanent pour trois intensités de précipitation (4, 8, 16 mm/h) et en régime transitoire avec ou sans drainage, en condition non saturées. Les colonnes ont été prélevées dans deux faciès de la ZNS des Calcaires de Beauce : un faciès homogène et un faciès hétérogène. La seconde partie de cette étude a été réalisée *in situ*, avec des expériences de traçage au bromure (Br^-) et de Bleu Brillant (BB) réalisées sur une fosse du site du Lycée de Saussaye (Chartres).

Les expériences en régime permanent ont montré que les deux faciès n'avaient pas le même comportement face au transport de soluté. Les courbes de percée pour le faciès homogène s'expliquent par un modèle de transport de type convectif dispersif classique (CDE), alors les CP pour le faciès hétérogène s'expliquent par un modèle de transport de type eau mobile – eau immobile (MIM). Les expériences en régime transitoire ont montré que la concentration augmentait pendant le drainage des colonnes. Ce phénomène peut s'expliquer par une distribution de la concentration en fonction de la taille des pores. L'analyse des colonnes au microtomographe a montré que la présence d'une matrice limoneuse dans le calcaire favorisait le transport. Les expériences de traçage au Br^- et BB sur le terrain ont montré que les faciès de calcaire sont très variables à l'échelle de quelques mètres. Les points d'échantillonnage les plus bas restituent en premier le traceur (Br^-). Ce transport préférentiel s'explique par l'agencement des faciès, qui a un impact important sur la forme du panache observé de BB. Des digitations apparaissent lorsqu'un contraste de perméabilité et l'agencement des faciès engendrent des écoulements localisés rapides.

Les phénomènes hors équilibre existent dans la ZNS du calcaire de Beauce et ont pour origine différents facteurs : la variation des conditions à la limite supérieur, l'état hydrique, l'hétérogénéité du milieu, tel qu'observé à l'échelle de la colonne, et le contraste de perméabilité et la présence de structures lithologique qui engendrent du transport préférentiel à l'échelle du terrain.

Mots clés : courbe de percée, zone non saturée, colonne non perturbée, régime transitoire, MIM, traçage

[Study of non-equilibrium solute transfer process. Application on vadose zone of the limestone of Beauce]

The purpose of this work is to study solute transport processes under physical non-equilibrium in the unsaturated zone of the Beauce limestone. This study has been divided into two parts, a laboratory part which consisted in conducting elution experiments with a steady state flow with three rainfall (4,8,16 mm/h) and under transient flow with or without drainage, in unsaturated structured columns. The columns have been sampled into two facies of the unsaturated zone of the Beauce limestone: a homogenous facies and a heterogenous facies. The second part of this study has been realized *in situ*, with tracing experiments realized on a pit dug at the site of the Lycée de Saussaye (Chartres).

The experiments in a steady state regime showed that the two facies do not have the same behaviour regarding solute transports. The breakthrough curve (BTC) for the homogeneous facies is explained with a classical convection dispersion solute transport model. The BTC for the heterogenous facies could be explained only with the mobile-immobile water model. The experiments under transient flow showed a rise of concentration during drainage. This phenomenon could be explained by a heterogeneous distribution of concentration as a function of pore size.

The tracing experiments with bromide (Br^-) and Brilliant Blue (BB) show that the limestone facies are very variable at the field scale. The lowest sampling points returned first the Br^- tracer. This preferential transport could be explained by the facies layout which has an important impact on the shape of the observed distribution of BB. Digitations appear when permeability contrast and facies layout produce localised fast flows.

Non-equilibrium phenomena exist in the unsaturated zone of the Beauce limestone and have different factors as origins: condition at the upper boundary limit, moisture condition, heterogeneity of the medium, as observed on columns, and contrast of permeability and lithological structures as observed at the field scale.



ISTO 1A rue de Férollerie, 45100 Orléans



Keywords: breakthrough curve, unsaturated zone, undisturbed column, transient flow, MIM, tracers