



HAL
open science

Étude du colmatage des systèmes d'irrigation localisée

S. Bounoua

► **To cite this version:**

S. Bounoua. Étude du colmatage des systèmes d'irrigation localisée. Sciences de l'environnement. Doctorat en Mécanique et physique des fluides, 2010. Français. NNT: . tel-02594885

HAL Id: tel-02594885

<https://hal.inrae.fr/tel-02594885>

Submitted on 15 May 2020

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

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

UNIVERSITE DE PROVENCE AIX-MARSEILLE I
ECOLE DOCTORALE SCIENCES POUR L'INGENIEUR
MECANIQUE, PHYSIQUE, MICRO ET NANOELECTRIQUE

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'AIX MARSEILLE UNIVERSITE

Spécialité : Mécanique et physique des fluides

Présentée et soutenue publiquement par

Salim BOUNOUA

le 3 décembre 2010

**ETUDE DU COLMATAGE DES SYSTEMES
D'IRRIGATION LOCALISEE**

JURY

GAY B.
MASION A.
HALDENWANG P.
GUAZZEZLLI E.
LABILLE J.
TOMAS S.

Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse

Thèse préparée au Laboratoire d'Essais et de Recherche des Matériels d'Irrigation
Cemagref LERMI/UMR G-EAU, Aix-en-Provence

et au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement
CEREGE, Aix-en-Provence

Chapitre I.....	12
I.1. Description des différentes Méthodes d'irrigation.....	13
I.1.1. Irrigation à la raie.....	13
I.1.2. Irrigation par aspersion.....	13
I.1.2.1 Couverture d'asperseur.....	13
I.1.2.2 L'enrouleur.....	14
I.1.2.3 Le pivot (rampe pivotante).....	15
I.1.2.4 Diffuseurs et micro-asperseurs.....	16
I.1.3. Le goutte à goutte ou micro-irrigation.....	17
I.1.3.1 Principe de la micro-irrigation en agronomie.....	17
I.1.3.2 Principe de fonctionnement des goutteurs en irrigation localisée.....	18
I.1.3.3 Courbe de variation du débit en fonction de la pression d'un goutteur.....	20
I.1.4. Détermination du coefficient de variation technologique (CV).....	22
I.2. Les différentes formes de colmatage.....	23
I.2.1. Le colmatage physique.....	23
I.2.2. Le colmatage organique ou biologique.....	24
I.2.3. Le colmatage chimique.....	25
I.2.4. Le colmatage mécanique.....	26
I.2.5. Synthèse.....	27
I.3. La qualité et l'origine de l'eau d'irrigation.....	27
I.3.1. Origine de l'eau.....	27
I.3.2. Température et pH.....	28
I.3.3. Concentration en sel.....	28
I.3.4. Concentration en colloïde.....	29
I.3.5. Cas des eaux marginales.....	29
I.3.6. Tableau de Synthèse du lien qualité d'eau et risques de colmatage.....	30
Chapitre II.....	32
II.1. Matériels et méthodes.....	33
II.1.1. L'installation pilote sur le terrain.....	33
II.1.2. Caractéristique du goutteur.....	35
II.1.2.1 La loi débit-pression.....	35
II.1.2.2 Modélisation de l'écoulement.....	36
II.1.3. Mode opératoire.....	39
II.1.3.1 Le protocole de mesure et d'échantillonnage hebdomadaire.....	40
II.1.3.2 Analyse granulométrique.....	40
II.1.3.3 Protocole de mesure de granulométrie par diffraction laser.....	41
II.1.3.4 Principe de la diffraction des rayons X.....	41
II.2. Résultats.....	42
II.2.1. Uniformité de la distribution de débit dans les goutteurs.....	42
II.2.2. Variation du débit.....	44
II.2.3. L'effet de la filtration sur le colmatage des goutteurs.....	45
II.2.4. L'effet de la purge sur l'intensité du colmatage.....	45
II.2.5. Mesure granulométrique.....	46
II.2.5.1 Variabilité de la qualité des eaux d'irrigation après filtration.....	46
II.2.5.2 Analyse granulométrique des particules.....	47
II.2.5.3 L'influence de la purge sur la granulométrie des particules.....	48
II.2.6. Caractérisation des espèces en suspension dans l'eau.....	49
II.3. Conclusion.....	50
Chapitre III.....	52

III.1.	Conditions de stabilité colloïdale	53
III.1.1.	Les forces de Van der Waals	53
III.1.2.	La polarité	54
III.1.3.	Répulsion des double-couche électriques	54
III.2.	Théorie DLVO et concentration critique de coagulation	56
III.2.1.	La théorie DLVO	56
III.2.2.	La concentration critique de coagulation (CCC).....	57
III.3.	Probabilité de chocs efficaces	57
III.4.	Les fréquences de collisions : cas pour le modèle rectilinéaire.	58
III.4.1.	Le mouvement Brownien	58
III.4.2.	Agitation mécanique du solvant.....	59
III.4.3.	Sédimentation différentielle	59
III.5.	Bilan de population	61
III.5.1.	Agrégation irréversible.....	61
III.5.2.	Agrégation réversible	62
III.5.2.1	Fréquence de rupture	62
III.5.2.2	Taille maximale de croissance	63
III.5.2.3	Prise en compte de la sédimentation	63
III.5.3.	Initialisation d'un modèle cinétique	64
III.5.3.1	Principe de discrétisation	64
III.6.	Modélisation de l'agrégation et estimation de la taille des particules argileuses. 67	
Chapitre IV	69
IV.1.	Stabilité colloïdale des argiles vis-à-vis du cisaillement et de la force ionique... 70	
IV.1.1.	Minéralogie des argiles par diffraction des rayons X	70
IV.1.2.	Potentiel électrique de surface mesuré par mobilité électrophorétique.....	71
IV.1.3.	Effet couplé de la force ionique et du cisaillement sur agrégation des particules 75	
IV.1.3.1	Principe du réacteur de Taylor-Couette	75
IV.1.3.2	Mélange argilo-calcaire.....	78
IV.1.3.3	La bentonite.....	78
IV.1.4.	Effets de la concentration en sel et du cisaillement sur la cinétique d'agrégation de la bentonite	80
IV.1.5.	Approche numérique de la cinétique d'agrégation.....	82
IV.2.	Étude du colmatage des goutteurs en laboratoire.....	86
IV.2.1.	Méthodes pour caractériser la cinétique de colmatage des goutteurs à long terme 86	
IV.2.2.	Influence de la charge en particules sur les débits à court terme	87
IV.2.3.	Résultats pour le mélange argilo-calcaire	88
IV.2.3.1	Effet de la durée quotidienne de fonctionnement sur le colmatage par le mélange argilo-calcaire	88
IV.2.3.2	Influence de la température sur le colmatage.....	92
IV.2.3.3	Influence de la charge en particules sur les débits dans les goutteurs.....	95
IV.2.4.	Résultat pour la bentonite.....	96
IV.2.4.1	Comparaison de différentes concentrations en NaCl	96
IV.2.5.	Bilan sur les trois lignes :	105
Conclusion et perspectives		108
Références bibliographiques		111

Figures

Figure I-1 : Un champ irrigué à la raie	13
Figure I-2 : Irrigation par asperseur	14
Figure I-3: Photo d'un asperseur	14
Figure I-4 : les différents composants de l'enrouleur	15
Figure I-5 : irrigation par pivot	15
Figure I-6 : Schéma d'un mini-diffuseur.....	16
Figure I-7: Schéma de principe du fonctionnement de l'irrigation localisée.....	17
Figure I-8 : Formes du volume de sol humidifié suivant les caractéristiques du sol	18
Figure I-9 : Goutteur à circuit uniforme (capillaire)	19
Figure I-10: Schéma du montage en dérivation du goutteur sur la rampe	19
Figure I-11 : Schéma d'un goutteur en ligne et du circuit de l'eau sur la rampe.....	20
Figure I-12 : Coupe longitudinale d'un goutteur intégré dans la rampe	20
Figure I-13: Exemple de courbe débit pression pour un goutteur non auto-régulant.....	21
Figure I-14 : Exemple de courbe débit pression pour un goutteur autorégulant.....	22
Figure I-15 : Colmatage physique dans le labyrinthe et au niveau de la grille d'entrée située à l'intérieur du tube	23
Figure I-16 : Colmatage biologique du filtre en amont de la rampe d'irrigation.....	24
Figure I-17 : Obstruction par des algues de l'orifice de sortie d'un goutteur	24
Figure I-18 : Colmatage ferrique des tubes par un biofilm développé par des bactéries sidérophores	25
Figure I-19 : Exemple de colmatage par précipitation de CaCO_3 , et son amorce sur une gaine	26
Figure I-20 : Schéma d'un goutteur capable d'accepter l'intrusion racinaire (a), exemple de bouchage par un insecte (b) et d'intrusion sur une gaine vue en coupe (c)	26
Figure II-1: Le site expérimental de Pertuis (84)	33
Figure II-2: Schéma technologique de l'ensemble de l'installation.....	34
Figure II-3: Dispositif pilote expérimental à la parcelle	34
Figure II-4: Photo du goutteur GR et du labyrinthe utilisé pour étudier le colmatage en irrigation	35
Figure II-5: courbe de débit-pression pour le goutteur GR.....	36
Figure II-6 : Photo du goutteur GR étudié	36
Figure II-7 : Maillage du labyrinthe effectué avec le logiciel Gambit.....	37
Figure II-8: Cartographie des lignes de courant dans le labyrinthe en fonction de leur vitesse, pour une circulation allant de droite à gauche.....	38
Figure II-9: Champs de cisaillement au sein du labyrinthe exprimé en s^{-1}	39
Figure II-10 Principe de la mesure granulométrique.....	40
Figure II-11 : Schématisation de la mesure granulométrique de la suspension.....	41
Figure II-12: Evolution temporelle des débits avec des eaux brutes (sans filtration)	43
Figure II-13: Evolution temporelle des débits avec des eaux filtrées	43
Figure II-14: Evolution temporelle de l'Ec pour des eaux filtrées et non-filtrées	44
Figure II-15 : Effet d'une purge sur les goutteurs situés en fin de ligne	46
Figure II-16 Variabilité en charge de particule de la ressource en eau	47
Figure II-17: Evolution de la taille des particules entre le début et la fin de la ligne	48
Figure II-18 : Taille des particules en eau filtrée en fin de ligne, avec et sans purge.....	49
Figure II-19 : Minéralogie de l'eau de purge déterminée par diffraction des rayons X.....	50
Figure III-1: Distribution des contre-ions à la surface d'une particule chargée en suspension selon le modèle de la double-couche électrique.....	54

Figure III-2 : Modèle de la double-couche diffuse autour d'une particule chargée en suspension	55
Figure III-3 : Représentation des énergies pour le calcul DLVO.....	57
Figure III-4 : Collision par effet Brownien	59
Figure III-5 : Collision par effet de l'agitation mécanique (G).....	59
Figure III-6 : collision par effet de la sédimentation.....	60
Figure III-7 : Processus d'évolution des agrégats	62
Figure III-8 : Evolution de la concentration de particules de masse k.....	63
Figure III-9: Discrétisation linéaire en classe de taille.....	64
Figure III-10: Discrétisation géométrique en classe de taille.....	66
Figure III-11: Gestion des chocs dans le cas d'une discrétisation géométrique	67
Figure IV-1 : Minéralogie du mélange argilo-calcaire.....	70
Figure IV-2 : Minéralogie de la bentonite.....	71
Figure IV-3: photo du Zetamètre et de la cellule de mesure	72
Figure IV-4: Schéma de la double couche diffuse en surface d'une particule chargée immergée dans un électrolyte.....	73
Figure IV-5: Principe de mesure du potentiel zêta	73
Figure IV-6 : Effet du NaCl sur la charge surfacique du mélange argilo-calcaire.....	74
Figure IV-7: Effet de la force ionique sur la charge surfacique de la bentonite	74
Figure IV-8 : Schéma d'un réacteur de type Taylor-Couette.....	75
Figure IV-9 : Schéma de principe pour la mesure granulométrique sous cisaillement contrôlé	77
Figure IV-10 : Distribution volumique de la taille des particules du mélange argilo-calcaire sans adjonction de sel.....	78
Figure IV-11 : Effet de la force ionique sur la taille des particules du mélange argilo-calcaire	78
Figure IV-12 : Distribution volumique de la taille des particules de bentonite, en fonction du cisaillement, sans adjonction de sel.....	79
Figure IV-13 : Taille médiane D50 des particules de bentonite en fonction du cisaillement et de la concentration en sel. Chaque mesure est enregistrée après 36 minutes de stabilisation. 79	
Figure IV-14 : Effet de la concentration de sel sur l'évolution temporelle du D50 pour les valeurs de cisaillement de $G=20s^{-1}$ (a), $G=60s^{-1}$ (b) et $G=210s^{-1}$ (c)	81
Figure IV-15: la cinétique d'agrégation exprimée en échelle logarithmique en fonction du cisaillement à.....	82
Figure IV-16 : Calibrage du model de Thill sur les résultats du Taylor-Couette à 10^{-1} M (a) et 10^{-2} M (b) NaCl.....	84
Figure IV-17 : Extrapolation de taille de floc pour $G = 1000 s^{-1}$	85
Figure IV-18 : Banc d'essai pour le mélange argilo-calcaire.....	87
Figure IV-19 : Capteur de masse SP4C3-MR.....	88
Figure IV-20 : Schéma représentatif du principe de l'expérimentation.....	88
Figure IV-21 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour la ligne 1 (1h/jour).....	89
Figure IV-22 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour la ligne 2 (1h/jour).....	90
Figure IV-23 : Evolution temporelle du E_c pour les lignes 1 et 2 fonctionnant 1h/jour.....	90
Figure IV-24 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour les lignes 3, 4, 5 et 6 (8h/jour).....	91
Figure IV-25 Evolution temporelle du débit moyen sur les lignes 3, 4, 5 et 6 (8h/jour)	92
Figure IV-26 : Evolution temporelle de E_c sur les lignes 3, 4, 5 et 6 (8h/jour).....	92
Figure IV-27 : Evolution temporelle du débit des goutteurs.....	93

Figure IV-28 : Nombre de goutteurs dont le débit est supérieur à 70% du débit en eau claire (Q_0)	93
Figure IV-29 : Evolution temporelle du débit moyen	94
Figure IV-30 : Photographie du colmatage dans le labyrinthe (a et a') et dans la grille d'entrée (b et b'), pour les goutteurs numéro 3 et 8 et sur le	94
Figure IV-31 : Suivi des débits par pesées en continu sur le mélange argilo-calcaire.....	95
Figure IV-32 : Schéma du système utilisé pour les tests de colmatage	96
Figure IV-33 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour $[NaCl]= 0 M$ (8h/jour).....	97
Figure IV-34 : Evolution du débit moyen de la ligne dans le temps (charge particulaire de l'eau = $0.2g/L^*$; $[NaCl] = 0M$).....	97
Figure IV-35 : L'évolution temporelle du %Ec par rapport au débit en eau claire.....	98
Figure IV-36 : Vue sous microscope de l'état du labyrinthe pour le cas sans sel sur les goutteurs colmatés (a) et non-colmatés (b)	99
Figure-IV-37 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour $[NaCl]= 10^{-3}M$ (8h/jour).....	100
Figure IV-38 : L'évolution temporelle du débit moyen pour la concentration de $10^{-3} M$ zn NaCl	100
Figure IV-39 : L'évolution temporelle du %Ec pour la concentration de $10^{-3} M$ zn NaCl....	101
Figure IV-40 : Vue sous microscope de l'état du labyrinthe pour le cas $0.001M$ NaCl, sur les goutteurs colmatés (a) et non-colmaté (b).....	102
Figure IV-41 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour $[NaCl]= 10^{-2}M$ (8h/jour).....	102
Figure IV-42 :L'évolution temporelle du débit moyen pour la concentration de $10^{-2}M$ zn NaCl	103
Figure IV-43 : évolution temporelle du %Ec par rapport à la moyenne du débit mesurée en eau claire	103
Figure IV-44 : Vue sous microscope de l'état du labyrinthe pour le cas $0.01M$ NaCl, sur les goutteurs colmatés (a) et non-colmaté (b)	104
Figure IV-45 : La variation du débit dans le temps pour les 3 concentrations de sel.	105

Tableaux

Tableau I-1: Valeurs de x pour différents types de goutteur.....	21
Tableau I-2 : Classes d'appréciation de l'homogénéité des goutteurs en fonction du CV	22
Tableau I-3 : Les différents paramètres et leurs risques de colmater les goutteurs.....	30
Tableau III-1 : Ordre des grandeurs des particules susceptibles d'être présentes dans les eaux d'irrigation.....	53
Tableau IV-1 : Valeurs de cisaillement en fonction de la vitesse de rotation du réacteur Couette-Taylor.	77
Tableau IV-2: Paramètres d'entrées dans le code de Thill pour 10^{-1} M et 10^{-2} M NaCl	83
Tableau IV-3 : Extrapolation des tailles de particule à $G=10^{+3}s^{-1}$ à partir des courbes de tendance.....	85
Tableau IV-4 : Récapitulatif du protocole expérimental.....	87
Tableau IV-5 : Récapitulatif des résultats sur les trois lignes tester à différents concentration en sel.....	105

INTRODUCTION

L'irrigation localisée ou micro-irrigation est apparue il y a une trentaine d'années. Cette méthode consiste à apporter l'eau d'irrigation non pas sur l'ensemble de la surface mais au pied de la culture ou sur le rang pour limiter les pertes parasites. Elle a d'abord connu un développement faible par rapport à l'irrigation par aspersion, essentiellement pour des raisons techniques liées à la complexité de sa mise en œuvre, et ce malgré ses avantages : permettre d'économiser l'eau, nécessiter peu de main d'œuvre une fois installée, maintenir de bonnes conditions phytosanitaires pour la culture et consommer peu d'énergie du fait de faibles besoins de pression.

La performance de ce type d'application et les possibilités de contrôles sont telles que l'on peut appliquer sans difficultés les engrais au moyen du système d'irrigation (fertigation), voire certains types de traitement phytosanitaire. Dans le même ordre d'idées, l'application d'effluents de stations d'épurations traités par irrigation localisée pour l'agriculture ou les espaces verts est répandue dans certaines zones arides (Tunisie, Chypres, Israël, Californie) et semi-arides. Du fait des tensions croissantes sur les ressources en eau de bonne qualité, elle tend à se répandre dans le monde entier.

Cependant, le développement de la micro-irrigation reste encore limité à certaines régions et à certaines cultures (principalement arboriculture et cultures de légumières). La raison principale est que l'irrigation localisée coûte cher et reste plus difficile à maîtriser que les techniques classiques. Pour les cultures annuelles comme pour les cultures pérennes, étant donné le coût des installations et leur rôle central dans la performance d'ensemble de la production, la durabilité des équipements de micro-irrigation est une préoccupation constante des agriculteurs. Le colmatage progressif des goutteurs d'irrigation localisée cause des pertes économiques importantes. Il justifie souvent le recours à des systèmes annuels jetables (ou gaines), dont le coût à l'hectare est finalement très supérieur à celui de solutions plus pérennes, sans parler de la consommation indirecte de carbone. Lorsque l'agriculteur constate une variation des débits de quelques goutteurs du fait d'un début de colmatage, il compense les déficits locaux d'apport d'eau en augmentant les durées d'irrigation. Le colmatage n'étant pas forcément homogène, les quantités d'eau apportées en moyenne sont finalement soit excédentaires soit déficitaires suivant les endroits dans les parcelles. Ces excès d'eau peuvent entraîner du lessivage des solutés présents dans le sol, voire des problèmes locaux d'hydromorphie où le sol sera saturé et les racines plongées dans une zone anaérobie. Les conséquences pour l'environnement sont aggravées par le fait que la plupart des agriculteurs pratiquent l'irrigation fertilisante. Finalement, le phénomène de colmatage a pour conséquence de raccourcir la durée de vie d'un équipement à la parcelle déjà coûteux par rapport aux autres systèmes techniques, donc cela limite le revenu des agriculteurs, en plus de l'éventuelle augmentation des consommations d'eau.

Même si les principales causes du colmatage sont connues (Nakayama; Gilbert et al., 1979), on n'arrive pas toujours à le contrôler correctement, parce que les mécanismes en jeu sont mal connus. Les procédés à mettre en œuvre pour le limiter augmentent le coût des équipements et de la maintenance. Ceci explique que cette méthode soit parfois abandonnée au profit de méthodes moins efficaces mais mieux maîtrisées par les agriculteurs, en particulier dans les pays en développement, où les problèmes de ressources en eaux sont les plus aigus. Au Maghreb comme dans certaines zones de l'Europe, les pouvoirs publics soutiennent l'irrigation localisée par une politique de subventions massives. Mais faute d'actions suffisantes pour accompagner ou former les agriculteurs, on observe souvent une augmentation des consommations d'eau plutôt que des économies, comme en témoignent les résultats d'enquêtes effectuées sur certains périmètres en Tunisie et au Maroc (Mailhol, 2004,

Molle, 2005). En région PACA les organismes d'appui technique constatent une durée de vie moyenne du matériel de trois à sept ans suivant les endroits, alors qu'on peut atteindre 10 ans à 15 ans avec une bonne maîtrise sur des sites voisins.

Ces exemples justifient les efforts investis dans la compréhension des causes et des mécanismes conduisant au colmatage des goutteurs. En effet, comprendre et prédire le risque de colmatage permettrait de proposer des solutions en amont lors de la conception des goutteurs, des méthodes de maintenance plus performantes et assurerait véritablement une irrigation économe en eau, en main d'œuvre et en énergie, permettant un meilleur retour sur investissement.

Cette thèse s'attache à améliorer la compréhension du fonctionnement des goutteurs de micro-irrigation vis-à-vis du risque de colmatage et les conséquences sur leur durabilité. En particulier on cherche à analyser les déterminants des problèmes de colmatage, ce qui revient à cerner les paramètres et les variables physico-chimiques, voire d'évoquer l'origine biologique de ces phénomènes. Ce type d'approche étant très peu abordé dans la littérature, il est nécessaire de passer par une phase expérimentale avant d'avancer des explications théoriques. L'approche est donc mixte, expérimentale et théorique.

L'objectif de ce travail peut être résumé comme suit :

- définir d'un point de vue qualitatif la nature et la composition du colmatage physique en conditions naturelles, et identifier quelques phénomènes chimiques, organiques et biologiques pouvant avoir un effet aggravant ;
- identifier les phénomènes de colmatage physico-chimique (par des particules minérales) au laboratoire dans l'optique d'établir une relation : d'une part entre le colmatage et la qualité de l'eau d'irrigation (pH, concentration en sels) et d'autre part entre le colmatage et les conditions hydrauliques (vitesse de l'écoulement, taux de cisaillement et temps de repos) ;
- utiliser ces résultats pour paramétrer le modèle de Thill permettant de simuler les phénomènes d'agrégation existant dans une suspension soumise au cisaillement ;
- caractériser la cinétique du colmatage et identifier d'éventuels phénomènes de dé-colmatage (remise en suspension).

Pour répondre à ces objectifs, ce manuscrit se présente comme suit :

Dans le chapitre I, on détaillera les principaux systèmes d'irrigation utilisés dans le monde, ainsi les problèmes qui sont liés au colmatage des goutteurs en micro-irrigation. Le chapitre II décrit les dispositifs mis en œuvre pour étudier le colmatage des goutteurs qui sont alimentés d'une part, par des eaux brutes de la Durance et d'autre part des eaux filtrées. Durant la campagne d'irrigation, on suivra l'évolution du débit en sortie de goutteurs qui servira d'indicateur de colmatage et on identifiera les causes de ce colmatage par analyse de la matière colmatante et des eaux utilisées.

Suite à ces résultats, le chapitre III traitera la théorie des phénomènes d'agrégations des argiles, ainsi que les facteurs qui favorisent leur coagulation. On verra aussi les modèles développés pour simuler ces évolutions de population. Le chapitre IV présente les différentes méthodes et protocoles développés pour étudier ces mécanismes dans le cas du goutte à goutte et leur influence sur le colmatage des goutteurs. Nous proposons aussi une méthode pour estimer la taille des particules d'argile dans le cas de cisaillements très élevés tels que ceux observés dans les labyrinthes. Les résultats sont présentés concernant l'évolution temporelle des débits des goutteurs en fonction du type d'argile, de la température, de la charge en argile et de la force ionique présente dans la solution qui

alimente les rampes. Le chapitre V reprend les conclusions des expériences in-situ et en laboratoire pour ouvrir sur les perspectives.

Chapitre I

Systemes d'irrigation

En cinquante ans, les surfaces irriguées ont plus que triplé pour atteindre plus de deux millions d'hectares. Facteur clé de la maîtrise de la production agricole, l'irrigation a un impact économique et social considérable mais ne doit pas engendrer de conséquences néfastes au plan écologique. Pour répondre à cette exigence, deux points doivent être retenus

- la maîtrise des techniques d'irrigation afin d'augmenter son efficacité ;
- l'optimisation des apports d'eau pour protéger la ressource en eau et éviter la dégradation des sols et les pollutions diffuses.

Dans ce chapitre, le principe des différentes méthodes d'irrigation est présenté dans l'objectif de pointer les spécificités de l'irrigation localisée et les enjeux liés à son fonctionnement.

I.1. Description des différentes Méthodes d'irrigation

I.1.1. Irrigation à la raie

L'irrigation gravitaire (Figure I-1), encore appelée irrigation de surface, est la méthode d'irrigation la plus répandue dans le monde (75% des surfaces). Dans le sud de la France, l'irrigation à la raie reste pratiquée en raison de sa bonne adaptation à certains contextes locaux de basses vallées alluviales (plaine de Crau). Souvent accusée de gaspiller l'eau, l'irrigation gravitaire peut être efficace si elle est bien maîtrisée et modernisée.



Figure I-1 : Un champ irrigué à la raie

I.1.2. Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion, en France, s'est développée rapidement après la deuxième guerre mondiale. Ce mode d'irrigation est pratiqué sur environ 90% de la surface irriguée en France, au niveau mondial celle-ci représente un peu moins de 20% des surfaces irriguées. L'évolution technique des systèmes d'irrigation par aspersion a été influencée en permanence par le souci d'économiser de la main d'œuvre et de diminuer la pénibilité du travail. On peut classer les équipements d'irrigation par aspersion en deux types : les couvertures d'asperseurs et les machines à irriguer. Alors que dans le cas d'une installation d'irrigation par couverture d'asperseurs, les appareils goutteurs d'eau sont en position fixe durant leur fonctionnement, les machines à irriguer (enrouleurs, pivots, rampes frontales) ont la faculté de déplacer le ou les goutteurs d'eau durant l'arrosage. L'apparition des machines à irriguer trouve son origine dans le souci de réduire le travail de déplacement manuel des éléments d'arrosage ou de baisser l'investissement par rapport à la couverture intégrale d'asperseurs. L'installation d'une couverture d'asperseurs mobilise un grand nombre d'appareils goutteur d'eau si bien que l'adéquation de l'installation au parcellaire est en général bonne. De même la conduite des arrosages peut être rigoureuse sur la base de données agronomique et technique avérées.

I.1.2.1 Couverture d'asperseur

Les premiers réseaux d'irrigation par aspersion furent équipés d'asperseurs disposés en ligne le long d'une rampe mobile (Figure I-2), qu'on démontait et déplaçait à la main, de poste en poste, pour irriguer l'ensemble de la parcelle. Peu coûteux en investissement, ce

Le système est exigeant en main d'œuvre. Pour cette raison il a évolué vers la couverture intégrale, qui consiste à disposer sur la parcelle irriguée l'ensemble des asperseurs. Une fois posé, le réseau ainsi conçu reste fixe pendant toute la saison d'irrigation.



Figure I-2 : Irrigation par asperseur



Figure I-3: Photo d'un asperseur

Cette méthode présente l'avantage de réduire le besoin de main-d'œuvre, d'obtenir une répartition homogène de l'eau sur l'ensemble de la surface irriguée, elle est adaptable à toutes les formes de parcelle (topographie du site), à toutes les natures de sol, et à toutes les cultures.

I.1.2.2 L'enrouleur

L'enrouleur est le matériel d'irrigation par aspersion le plus utilisé en France : 55% des surfaces irriguées sous pression. Ce succès provient de sa grande souplesse d'utilisation, des faibles contraintes de main-d'œuvre et des investissements modérés qu'il nécessite. Bien utilisé, l'enrouleur peut dispenser un arrosage de qualité tout à fait satisfaisant. Toutefois, des enquêtes ont montré que les utilisateurs d'enrouleurs manquaient souvent des informations nécessaires pour bien choisir leur équipement et effectuer les bons réglages pour un arrosage homogène. La généralisation de l'utilisation de régulations électroniques d'enroulement a considérablement amélioré les performances de ces appareils. Il est composé d'un canon d'arrosage monté sur un traîneau ou sur un chariot tracté par le tuyau d'alimentation en eau en polyéthylène, qui s'enroule sur une bobine disposée sur un châssis et entraînée par un moteur hydraulique (Figure I-4).



Figure I-4 : les différents composants de l'enrouleur

L'arrosage se fait par bandes rectangulaires successives dont la largeur dépend de la portée du canon qui équipe l'enrouleur. Le canon est un asperseur à grande portée (25 à 70m). Le canon nécessite une pression entre 5 à 8 bars, soit une pression à l'entrée de l'enrouleur de 7 à 10 bar. La pluviométrie est relativement peu intense en moyenne : 8 à 12mm/h, mais l'apport se faisant sous forme d'un jet dirigé au cours de passage très brefs (quelques secondes par minute), l'énergie cinétique apportée peut être néfaste pour certain type de sols limoneux par exemple à faible structuration. Pour fournir une bonne homogénéité d'arrosage, le canon doit fonctionner dans une plage de pression relativement étroite, avec un écartement entre passage spécifique et un angle de balayage adapté aux deux paramètres précédents.

I.1.2.3 Le pivot (rampe pivotante)

Le pivot également appelé rampe pivotante est un appareil d'irrigation mobile, arrosant en rotation une surface circulaire ou semi-circulaire (Figure I-5). Il est en général à poste fixe, mais il peut être conçu pour être déplacé entre parcelles voisines.



Figure I-5 : irrigation par pivot

L'irrigation par rampe d'arrosage inventée aux USA vers la fin des années 40, a débuté en France au cours des années 60. Convenant bien à l'irrigation des grandes surfaces, le pivot s'est d'abord développé dans des zones plates des Landes, sur des parcelles de grande taille jusqu'à 200 ha. Il se développe de plus en plus dans des zones où son utilisation semblait moins évidente, sur des parcelles plus petites, où il permet l'épandage de fertilisants et de pesticides, et s'adapte à des pentes pouvant atteindre localement 15%. La longueur « idéale » d'un pivot (investissement, charges d'entretien, risque) se situe aux alentours de 400m, soit une parcelle de 50 ha environ. L'intérêt essentiel de ce type de matériel est sa simplicité de mise en œuvre, ses possibilités de fonctionnement automatique et ses performances en terme d'uniformité et d'apport d'eau y compris en conditions ventées.

I.1.2.4 Diffuseurs et micro-asperseurs

Les micro-asperseurs arrosent de petites surfaces de sol par aspersion, sous forme de tache ; c'est une technique intermédiaire entre le goutte à goutte et l'aspersion. Elle permet de s'affranchir de contraintes liées aux caractéristiques hydrodynamiques du sol (forte conductivité et faible capillarité) ou à la présence de macropores dues à la fissuration ou à la faune du sol. Lorsque des contraintes de ce type ne permettent pas un fonctionnement acceptable du goutte à goutte ou nécessitent une trop forte densité du goutteur la micro-aspersion fournit une bonne alternative. Elle permet en outre d'avoir un développement racinaire dans un volume de sol plus important.

- **Les mini-diffuseurs**

Les mini-diffuseurs fonctionnent comme de petits asperseurs statiques ne couvrant qu'une partie de la surface du sol au voisinage des cultures. Du point de vue hydraulique, ils sont tous à cheminement court. Ils sont constitués d'une base comportant un orifice calibré au travers duquel l'eau passe sous forme de jet et d'une tête formant un déflecteur sur laquelle le jet vient éclater (Figure I-6).

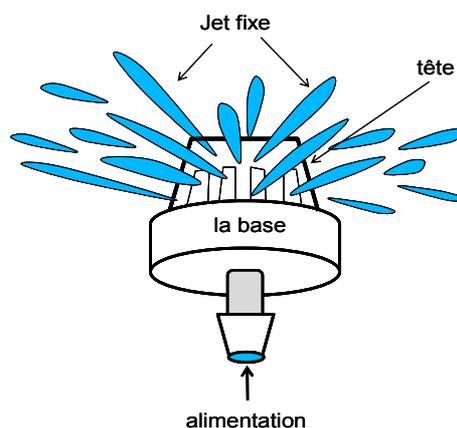


Figure I-6 : Schéma d'un mini-diffuseur

Le débit nominal est compris entre 20 l/h et 150 l/h mais les valeurs les plus couramment utilisées sont 20, 30 et 40 l/h. Pour un même fabricant chaque modèle est généralement repéré par une couleur différente. La portée est limitée à 1 ou 2 mètres et la forme des surfaces arrosées varie selon le type de tête utilisée (plein cercle, demi-cercle, pinceau, etc.). Les mini-diffuseurs sont toujours placés en dérivation. Ils sont fixés directement sur la rampe (rampe suspendue) ou reliés à celle-ci par un tube conducteur. Dans ce cas, ils sont attachés à

un support vertical ou suspendus tête en bas, et stabilisés en position verticale par une masse d'alourdissement (Tiercelin .1998).

- **Les ajutages calibrés**

Les ajutages sont constitués d'orifices calibrés (1,2 à 2,1 mm de diamètre) fixés en dérivation sur la rampe à intervalles réguliers (2,5 à 6,5 m) et recouverts d'un manchon brise-jet. L'eau distribuée par les ajutages ne s'infiltré pas ponctuellement mais s'écoule dans une rigole cloisonnée constituant une série de petits bassins au fond de laquelle est placée la rampe. Selon le diamètre de l'ajutage, le débit varie de 35 à 100 l/h, sous une pression de 1 bar. Ces systèmes ne peuvent pas être assimilés à du goutte à goutte mais restent de l'irrigation localisée, même s'ils fonctionnent avec de forts débits.

I.1.3. Le goutte à goutte ou micro-irrigation

Concernant la France, l'irrigation localisée représente 4 % à 5% des surfaces, soit environ 65 000 ha, mais avec un fort enjeu en terme de revenu, puisqu'elle concerne exclusivement des cultures à haut produit brut. Le goutte-à-goutte se développe surtout sur les cultures maraîchères, l'arboriculture et depuis peu la viticulture.

I.1.3.1 Principe de la micro-irrigation en agronomie

Le goutte à goutte, également appelé micro-irrigation, désigne une technique d'irrigation caractérisée par des apports d'eau faibles, fréquents et localisés au voisinage des cultures (Figure I-7). « Micro-irrigation » est le terme utilisé par la CIID (Commission Internationale pour l'étude des Irrigations et du Drainage, 1976) en raison des faibles débits mis en œuvre au niveau des goutteurs. « Irrigation localisée » est le terme utilisé par la FAO (Food and Agriculture Organisation - 1979).

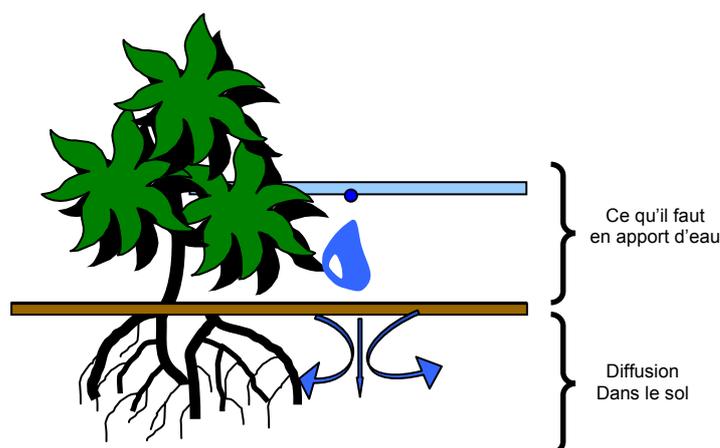


Figure I-7: Schéma de principe du fonctionnement de l'irrigation localisée

Cette méthode d'arrosage fondamentalement différente de celles qui cherchent à couvrir une surface (irrigation gravitaire ou aspersion), consiste à réapprovisionner en eau, périodiquement une partie du réservoir du sol. La réserve d'eau ainsi reconstituée dans le sol, détermine le laps de temps qui sépare deux arrosages successifs. En irrigation localisée, on ne

cherche pas à reconstituer la totalité des réserves en eau du sol. L'eau dont a besoin la plante est apportée en petites quantités, une ou plusieurs fois par jour, de façon ponctuelle. Elle diffuse radialement sous l'effet des forces capillaires et verticalement sous l'effet de la gravité, dans un volume de sol limité au voisinage des racines, dans lequel la plante puisera. Il est indispensable de connaître le besoin hydrique de la plante à chaque apport d'eau, ce qui détermine la fréquence des apports, dont le volume varie au cours de la saison.

Il se forme sous le goutteur une zone saturée de faible volume, d'où la majeure partie de l'eau diffuse en écoulement non saturé. Pour un débit et une durée d'arrosage déterminés, la forme et les dimensions du volume de sol humidifié (ou bulbe) dépendent des caractéristiques hydrodynamiques du sol. La Figure I-8 montre deux exemples de forme de bulbes sur un sol de type argileux, avec une diffusion latérale importante du fait de la faible vitesse d'infiltration, et sableux avec une diffusion verticale plus importante.

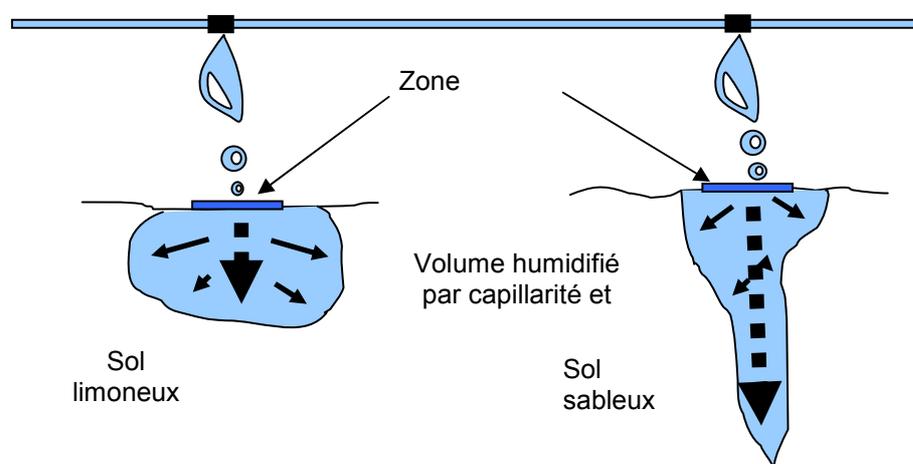


Figure I-8 : Formes du volume de sol humidifié suivant les caractéristiques du sol

La conduite de l'arrosage en goutte à goutte cherchera à maintenir le bulbe humide pour permettre aux plantes un certain confort hydrique pendant toute la saison d'irrigation et pour éviter tous phénomènes de fissurations du sol, en suivant le développement du système racinaire au cours de la croissance

I.1.3.2 Principe de fonctionnement des goutteurs en irrigation localisée

En irrigation localisée, l'eau est transportée le long des rayons de culture par une canalisation principale (ou rampe) le long de laquelle des goutteurs intégrés ou rapportés assurent la distribution en eau au strict voisinage des plantes. Les goutteurs ont un faible débit compris entre 0.5 et 8 l/h sous une pression de 0.5 à 4 bars, suivant que l'on a des goutteurs à compensation de pression ou non. A travers le goutteur, l'eau suit un cheminement complexe et plus ou moins long (0,1 à 1m), qui induit une dissipation de la pression. Il s'en suit que le débit des goutteurs est relativement peu dépendant de la pression auxquels ils sont soumis. Pour déterminer la pression de fonctionnement des réseaux et la longueur maximum des rampes, on cherche en général à rester dans un intervalle de débit de 10% de part et d'autre du débit moyen. Cette caractéristique est essentielle, puisqu'elle détermine la longueur maximale des rampes sur le terrain pour conserver une bonne uniformité de distribution.

Il existe des goutteurs à circuit uniforme comme les capillaires (à l'origine de cette technique Figure I-9) et des goutteurs à circuit non uniforme. Dans les goutteurs à circuit uniforme, la section de passage de l'eau est constante tout le long du cheminement, les pertes de charge

sont engendrées par le frottement de l'eau le long des parois du capillaire, la régulation du débit se fait donc proportionnellement à la longueur du capillaire. Dans les goutteurs à circuit non uniforme, dits à chicanes ou à labyrinthe, des changements brusques de direction du filet liquide provoquent un effet de turbulences qui s'ajoute aux frottements le long des parois pour engendrer une dissipation de la charge. Les sections de passage sont, pour un même débit, plus importantes que celles des goutteurs à circuit uniforme.

Les industriels ont mis au point des goutteurs turbulents à circuit court généralement intégrés, pour diminuer l'encombrement du goutteur et la perte de charge qu'il produit dans la canalisation. La difficulté réside dans la définition d'un circuit court capable d'uniformiser la charge résiduelle en sortie de goutteur, sans créer de zones pièges à particules.

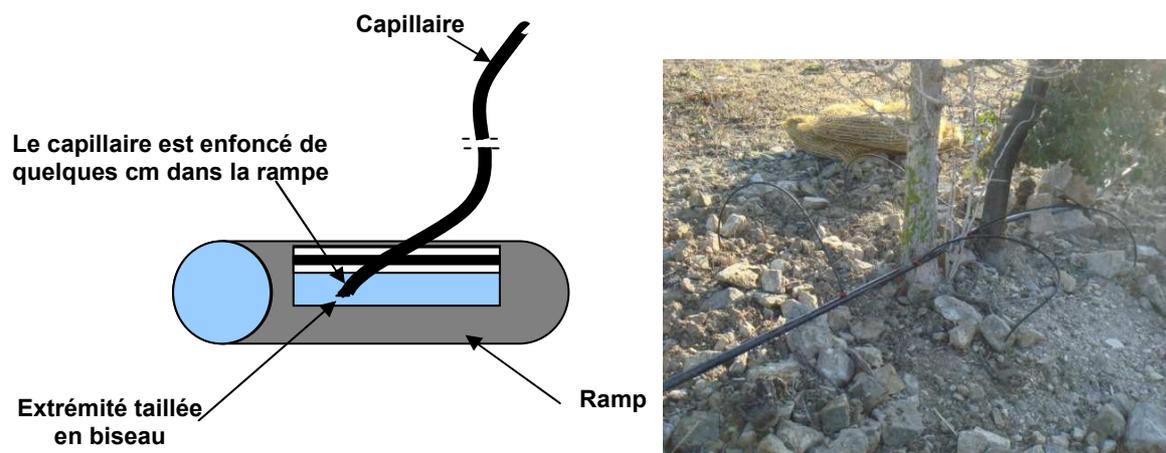


Figure I-9 : Goutteur à circuit uniforme (capillaire)

Il existe trois modes de fixation des goutteurs sur la rampe :

- **Les goutteurs monté en dérivation** ou rapportés ou on-line :

Ils sont fixés sur la rampe par l'intermédiaire d'un embout appelé « tête de vipère » (Figure I-10). Le montage en dérivation des goutteurs sur la rampe s'effectue sur le terrain, il ne convient pas aux dispositifs qui doivent être manipulés (risques d'arrachage).

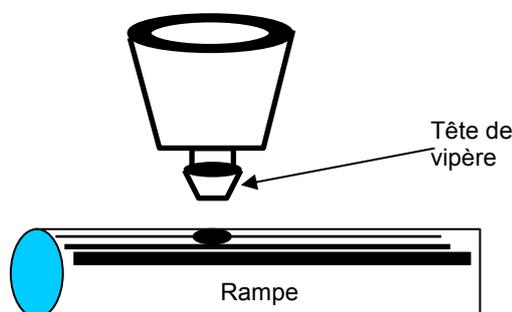


Figure I-10: Schéma du montage en dérivation du goutteur sur la rampe

- **Les goutteurs en ligne**

Il s'agit de goutteurs moulés, munis de deux embouts cannelés que l'on insère dans la rampe. Ce montage est effectué sur le terrain, après tronçonnage du tuyau, à des intervalles réguliers

qui varient selon les cultures auxquelles sont destinées les installations (écartements de 0.3 m à 2.5 m). Ce système n'est plus très répandu.

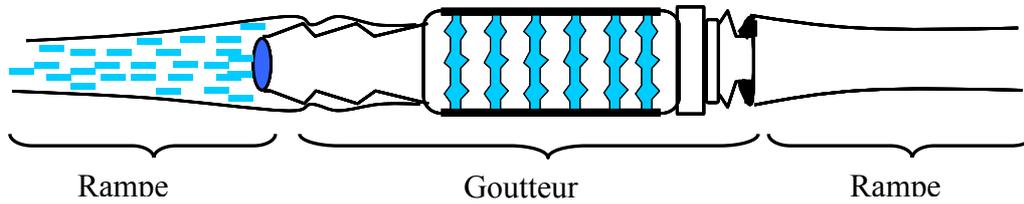


Figure I-11 : Schéma d'un goutteur en ligne et du circuit de l'eau sur la rampe

- **Les goutteurs intégrés ou in-line (par exemple : les goutteurs « GR »)**

L'élément portant le cheminement est mis en place dans le tuyau lors de son extrusion. Le tuyau est donc fabriqué autour du goutteur, les écartements sont imposés.



Figure I-12 : Coupe longitudinale d'un goutteur intégré dans la rampe

I.1.3.3 Courbe de variation du débit en fonction de la pression d'un goutteur

La relation entre le débit d'un goutteur et la pression dans la rampe au niveau de celui-ci est une loi de puissance de la forme :

$$Q = k \times H^x \quad \text{Eq I-1}$$

Avec :

Q = Débit du goutteur [l/h]

H = Pression s'exerçant dans la rampe exprimée en mètre de colonne d'eau [m CE]

X = Exposant dont la valeur dépend du régime d'écoulement hydraulique

K = Coefficient dépendant des unités utilisées.

Le calcul de cette courbe permet de définir la sensibilité de variation du débit aux variations de pression. Cette relation intervient dans le calcul des longueurs maximales de rampe. Selon la valeur du paramètre x, une même variation de pression n'entraînera pas une même variation de débit. Selon la sensibilité de leur débit aux variations de pression, les goutteurs sont répartis en deux classes : autorégulant ou non autorégulant.

- **Goutteurs non auto-régulant ou sans compensation de pression**

Le débit varie en fonction de la pression (Figure I-13). Selon le type d'écoulement à l'intérieur du goutteur, la valeur de x est comprise entre 0.3 et 1 (Jean Robert Tiercelin .1998).

Type de goutteur	Valeur de x
Circuit court à double orifice	X = 0.38
Circuit court à simple orifice	X = 0.48
Circuit long à chicane	X = 0.55
Circuit long uniforme	X = 0.7 à 0.8

Tableau I-1: Valeurs de x pour différents types de goutteur.

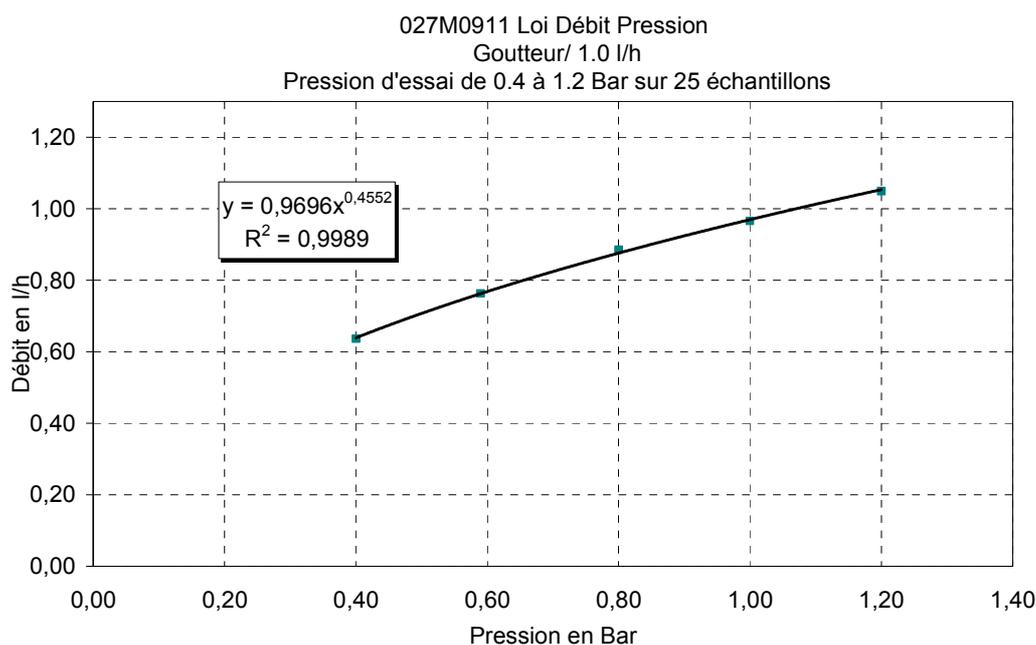


Figure I-13: Exemple de courbe débit pression pour un goutteur non auto-régulant

- **Goutteurs auto-régulant ou à compensation de pression**

Le débit, pour une certaine plage de valeur de pression, est pratiquement indépendant de celle-ci. La valeur de l'exposant x de la loi débit - pression est voisine de 0 (Figure I-14). La régulation du débit est obtenue par une membrane qui, selon la pression, se déforme et obture plus ou moins l'orifice de passage de l'eau (Tiercelin .1998).

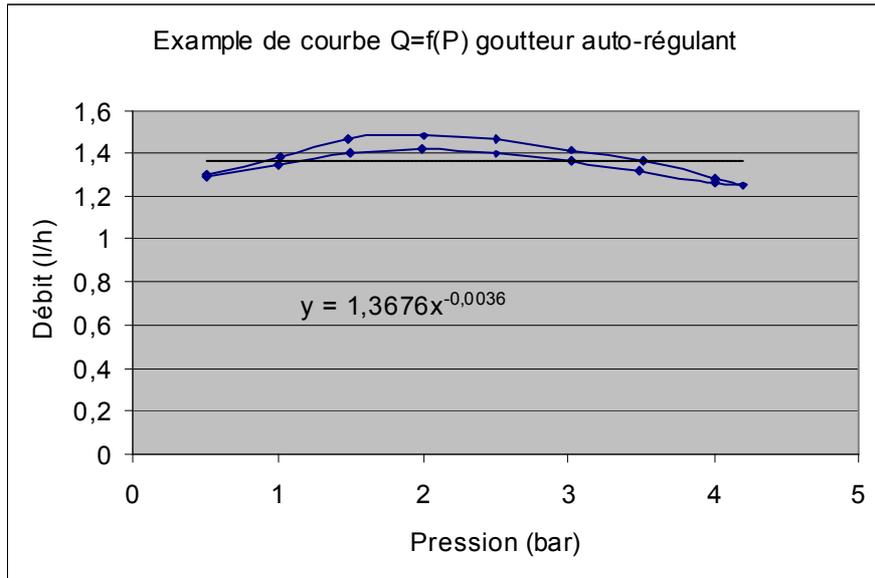


Figure I-14 : Exemple de courbe débit pression pour un goutteur autorégulant

I.1.4. Détermination du coefficient de variation technologique (CV)

Elle permet de quantifier la variabilité des débits d'un lot de goutteurs à une pression donnée et caractérise la qualité de fabrication. C'est un élément important à connaître car avec un dimensionnement correct de l'installation (choix des diamètres), il conditionne l'homogénéité de répartition de l'eau sur la parcelle. Le protocole utilisé est défini dans les normes ISO 9261 «Agricultural irrigation equipment – Emitters and Emitting-pipe systems - Specifications and tests methods ». Il est différent pour les goutteurs non autorégulant et autorégulant pour lesquels une phase de conditionnement des goutteurs est nécessaire.

Le coefficient de variation technologique CV est donné par la formule :

$$CV = \frac{\sigma}{Q_m} \quad \text{Eq I-2}$$

Avec : σ = écart type du débit de l'échantillon.

Q_m = débit moyen de 25 exemplaires du goutteur

L'homogénéité de fabrication est appréciée à partir de la valeur du coefficient de Variation CV selon quatre classes définies par le CEMAGREF (Tableau I-2).

Valeurs du CV	0	5	10	15
Appréciation par classe	Très bonne	Bonne	Médiocre	Mauvaise

Tableau I-2 : Classes d'appréciation de l'homogénéité des goutteurs en fonction du CV

I.2. Les différentes formes de colmatage

Le colmatage des goutteurs en irrigation localisée, est la cause majeure de baisse des performances à l'échelle de la parcelle (Pitts et al, 1990) et détermine donc la durée de vie du système de distribution. Le colmatage peut être d'ordre physique, biologique ou chimique et il est souvent causé par une association de différents facteurs parmi lesquels la qualité physico-chimique de l'eau d'irrigation, dans les interactions qu'elle crée, joue un rôle prépondérant.

I.2.1. Le colmatage physique

Le colmatage physique (ou minéral) est provoqué par des particules minérales en suspension dans l'eau. Ces particules entrent dans la constitution du sol d'où elles ont été arrachées lors de l'écoulement de l'eau avant sa captation pour les besoins d'irrigation. Elles sont souvent grossièrement classées par minéralogie en fonction de leur taille :

- sables grossiers : particules supérieures à $200\mu\text{m}$;
- sables fins : particules comprises entre $200\mu\text{m}$ et $50\mu\text{m}$;
- limons grossiers : particules comprises entre $50\mu\text{m}$ et $20\mu\text{m}$;
- limons fins : particules comprises entre $20\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$;
- argiles : particules de taille inférieure à $2\mu\text{m}$.



Figure I-15 : Colmatage physique dans le labyrinthe et au niveau de la grille d'entrée située à l'intérieur du tube

Elles peuvent agir sur l'obstruction des goutteurs de deux manières différentes :

- colmatage par obstruction : quand une des dimensions des particules est supérieure à la section de passage de l'eau à travers le goutteur (cas des particules de sables) ;
- colmatage lent ou limonage : quand les particules les plus fines se déposent progressivement aux endroits où la vitesse de circulation de l'eau est faible. Ce point d'accroche sert de support pour les prochaines particules et perturbe l'écoulement au sein du goutteur. Les dépôts sont localisés soit dans le labyrinthe, soit au niveau de la grille d'entrée censée empêcher les grosses particules de pénétrer dans le labyrinthe (Figure I-15).

Les argiles et les particules de la taille des limons, sont normalement trop petites pour colmater les goutteurs. Cependant, sous certaines conditions physicochimiques, les argiles peuvent s'agréger en aval du système de filtration et former des agrégats provoquant le colmatage (Pitts et al, 1990) soit directement, soit indirectement en retenant d'autres particules comme les limons. Ce phénomène de colmatage dû à l'agrégation est un des mécanismes qui seront particulièrement étudié dans ce travail. En effet, on considère qu'il constitue un préalable au développement d'autres phénomènes de colmatage, en particulier biologiques. De plus, il est probable que les engrais apportés lors d'opérations de fertigation aient un effet aggravant sur ce mécanisme.

I.2.2. Le colmatage organique ou biologique

Le colmatage organique (ou biologique) est provoqué par de la matière organique inerte présente dans les eaux de surface, ou plus souvent par le développement de matière organique vivante comme des algues, des bactéries (Figure I-16), voire certains champignons ou même des coquillages microscopiques. L'expansion des algues nécessite de la lumière, ce qui veut dire qu'elle a essentiellement lieu à la sortie des orifices (Figure I-17).



Figure I-16 : Colmatage biologique du filtre en amont de la rampe d'irrigation



Figure I-17 : Obstruction par des algues de l'orifice de sortie d'un goutteur

La prolifération de certaines bactéries sous forme de biofilm, peut engendrer l'accrochage ou le piégeage de certains solutés comme les carbonates de calcium ou des particules qui se trouvent en suspension dans l'eau d'irrigation (Gilbert et al, 1981). C'est en particulier le cas dans les eaux ferrugineuses, où ces biofilms peuvent même proliférer dans des canalisations en PVC, malgré des vitesses d'eau qui dans le cas de la Figure I-18 sont supérieure à 3m/s à la conception. Aussi, la pratique de la fertigation, c'est-à-dire l'apport d'élément fertilisant via le réseau d'irrigation localisée peut contribuer au colmatage des

réseaux en favorisant le développement de certains micro-organismes grâce à un apport supplémentaire en nutriment.



Figure I-18 : Colmatage ferrique des tubes par un biofilm développé par des bactéries sidérophores

I.2.3. Le colmatage chimique

Les eaux d'irrigation, qu'elles soient de forage ou de surface, contiennent différents éléments chimiques dissouts. Ces éléments sont en équilibre dans leur milieu d'origine. Lors du pompage, cet équilibre peut être rompu par la mise à l'air ou l'ajout des intrants¹ et des précipités peuvent alors apparaître. Les plus rencontrés sont les carbonates de calcium et les précipités de fer sous forme ferrique (Figure I-18), plus rarement des précipités de sulfate (Burt et al., 1995 ; Burt et Styles, 1994 ; Hills et al., 1989 ; Nakayama et Bucks, 1986).

La mise à l'air libre des eaux riches en gaz carbonique et en calcium provoque, au niveau des sorties des goutteurs, le dégazage du CO₂ et le dépôt localisé du CaCO₃ (Figure I-19). Ces dépôts sont déclenchés par l'oxygénation de l'eau mais d'autres facteurs interviennent tels que la température et le pH du milieu (Owen et al., 1998). L'apport d'éléments fertilisants tels que les composés contenant du phosphore, l'ammoniaque liquide, certain oligo-éléments (zinc, cuivre, manganèse) favorisent la précipitation des solutés (Pitts et al. 1990) et accélèrent le processus du dépôt, traduit par un colmatage.

¹ En agriculture, on appelle « intrants » les différents produits apportés aux terres et aux cultures, ce terme comprend : les engrais, les amendements (éléments améliorants les propriétés physiques et chimiques du sol, tels que le sable, la tourbe, la chaux...), les produits phytosanitaires et les activateurs ou retardateurs de croissance.



Figure I-19 : Exemple de colmatage par précipitation de CaCO_3 , et son amorce sur une gaine

I.2.4. Le colmatage mécanique

Le colmatage peut également être provoqué par des projections de particules de sol sur le goutteur, lors d'une pluie par exemple, ou par un contact direct de l'orifice du goutteur sur le sol. Il n'est pas rare que ces deux effets soient réunis (Chossat, 1995). De plus, sur les goutteurs qui sont situés en partie haute des parcelles, lors des phases d'arrêt d'irrigation, l'eau peut circuler en sens inverse de celui prévu et aspirer par les goutteurs quelques particules susceptibles de perturber l'écoulement ensuite. De manière générale, ce type de colmatage correspond donc à une obstruction par des éléments externes.

Par ailleurs, il arrive que les racinelles de certains végétaux pénètrent par l'ouverture des goutteurs lorsqu'ils sont posés sur le sol ou enterrés, et les obstruent (Figure I-18). Les constructeurs proposent des goutteurs dont le plastique est traité avec un désherbant (trifluralin par exemple) qui joue le rôle de répulsif pour les racines et évite leur intrusion. D'autres proposent des goutteurs équipés d'une valve qui se ferme lorsque le système est sans pression, ce qui fait que la racine "ne trouve" pas la source d'eau. Les orifices peuvent également être colonisés par des insectes, qui nichent ou pondent pendant l'arrêt des réseaux et provoquent ainsi leur colmatage.

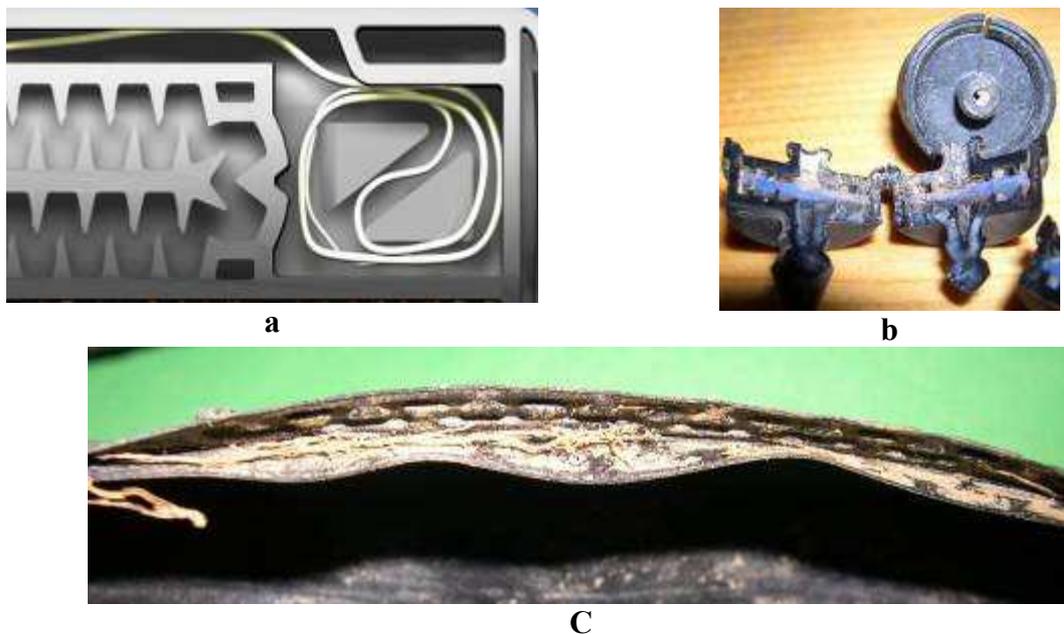


Figure I-20 : Schéma d'un goutteur capable d'accepter l'intrusion racinaire (a), exemple de bouchage par un insecte (b) et d'intrusion sur une gaine vue en coupe (c)

I.2.5. Synthèse

Pour conclure cette partie sur les origines du colmatage, il est utile de préciser que les causes sont rarement isolées mais très souvent combinées. En effet, comme nous venons de le voir, certaines bactéries peuvent contribuer au colmatage chimique en transformant le fer ferreux en fer ferrique, ou encore, la matière organique. Les mucus qu'elles produisent forment un biofilm, qui peut servir de fixateur aux particules minérales qui flocculent et forment ainsi des agrégats de taille plus importante. C'est pourquoi, il est très difficile de traiter chaque phénomène séparément, au contraire mieux vaut aller vers une approche plus globale (ou intégrée) du problème. Quels que soient le ou les facteurs qui sont à l'origine du colmatage, le cœur du problème réside dans la qualité de l'eau d'irrigation utilisée et son conditionnement par filtration.

I.3. La qualité et l'origine de l'eau d'irrigation

On a vu que le colmatage des goutteurs est directement lié à la qualité de l'eau d'irrigation. Celle-ci peut être caractérisée par sa charge en particules en suspension, sa composition chimique et le type d'organismes qui y prolifèrent. Les eaux de surface contiennent une grande variété de phytoplancton et zooplancton, qui peuvent rester à l'état dormant ou se développer durant le stockage. Les particules minérales en suspension peuvent s'agréger soit entre elles, soit avec d'autres matières d'origine organique comme des fibres végétales, les substances exopolymériques d'origine bactérienne. Ces derniers phénomènes sont abondants plus particulièrement dans les eaux des lacs collinaires (Adin, 1987 ; Ravina et al., 1992) ou les rivières. Les organismes aquatiques (certains coquillages par exemple) peuvent aussi proliférer dans tout le réseau d'irrigation (Nakayama et Bucks, 1991 ; Ravina et al., 1992). De tels problèmes peuvent être intensifiés par des réseaux très longs et une faible vitesse d'écoulement (Ravina et al., 1993).

La filtration, le traitement chimique de l'eau et le nettoyage à forte pression sont les moyens généralement utilisés pour prévenir ou lutter contre le colmatage du système d'irrigation (Nakayama et Bucks, 1991). Mais la filtration, obligatoire dans les systèmes de micro-irrigation, peut s'avérer compliquée. Le colmatage des filtres utilisés peut intervenir en quelques jours ou quelques dizaines de minutes suivant la situation. L'utilisation d'eaux de mauvaise qualité, éventuellement usées renforce ce besoin. Aussi, une bonne connaissance de la composition de l'eau aide à définir une méthode de prévention par un conditionnement adapté (Bucks et al. 1979; Nakayama, 1986 ; Nakayama et Bucks, 1991).

I.3.1. Origine de l'eau

Les eaux utilisées en irrigation localisée peuvent avoir diverses origines, qui leur confèrent des caractéristiques différentes et induisent un conditionnement spécifique :

- Eaux souterraines provenant de forages : plutôt riches en minéraux en solution, elles peuvent donner lieu à des précipitations, donc à un colmatage chimique ; ce type de colmatage se produit le plus souvent à la sortie du goutteur ; il peut être combiné avec des développements bactériens ;
- Eaux superficielles, provenant de rivières, de canaux, de lacs naturels ou artificiels, de retenues collinaires ou encore de bâches de rétention ; du fait du ruissellement dans des sols fragiles, elles sont souvent chargées en particules minérales, et sont responsables du colmatage physique ; par ailleurs, du fait du stockage prolongé, elles

peuvent avoir des taux élevés en algues et en bactéries et peuvent entraîner des colmatages organiques ;

- Eaux usées ou recyclées dont l'utilisation tend à se développer en micro-irrigation pour supprimer les risques de contacts : ce sont des eaux riches en matières en suspensions et solutés, issues en général du traitement de station d'épuration ou de recyclage d'eaux de lavage ou de drainage, qui peuvent être utilisées seules ou en association avec des eaux d'autre origine. Ce type d'eau peut provoquer les trois types de colmatage.

L'origine de l'eau implique donc un conditionnement particulier de sorte à limiter les facteurs favorisant le colmatage. Il n'existe aucune méthode quantitative reconnue pouvant permettre d'évaluer le potentiel de colmatage d'une eau donnée. Seule une méthode indirecte a été mise au point par des Israéliens et améliorée par un laboratoire Sud-Africain. Il s'agit de caractériser le pouvoir colmatant d'une eau, au moyen d'un filtre à tamis, par rapport à une taille de filtration donnée, correspondant aux mailles couramment utilisées en agriculture. On mesure le temps et le volume requis pour colmater partiellement l'élément de filtre dont la surface est fixée, mesuré par l'évolution de la perte de charge d'un écoulement le traversant. Ce travail est fait d'une part en amont, d'autre part en aval du filtre, on en déduit un index ou un pouvoir colmatant de l'eau servant à définir la filtration requise.

Une analyse de l'eau avant la mise en œuvre de l'installation peut être utile, en complément du recours à l'expérience des utilisateurs locaux. L'injection de fertilisant peut accentuer le risque de colmatage, en fonction de sa solubilité qui dépend de la nature de l'eau d'irrigation (Ford, 1977) et de son effet sur la charge de surface des particules (floculation ou dispersion).

I.3.2. Température et pH

Le colmatage est souvent aggravé par les variations de température car la solubilité de certains éléments en dépend. Le calcium, le magnésium, les carbonates lorsque le pH est supérieur à 7,2 avec une température élevée, vont précipiter dans les tubes et dans les goutteurs. La solubilité du CaCO_3 est inversement proportionnelle à la température (Hill et al., 1989). Mais si l'augmentation de la température favorise la précipitation, une fois le précipité formé, la diminution de la température ne dissout pas la couche de CaCO_3 . Ces précipités dus au carbonate de calcium, s'accumulent dans le cheminement étroit des goutteurs en accélérant le colmatage. Il faut savoir que les systèmes de surface, dont les tubes sont noirs, peuvent voir leur température dépasser 80°C aux heures les plus ensoleillées de la journée.

La formation de phosphat sous forme de précipité dépend de plusieurs facteurs (Boman, 1990) tels que le pH, la température, la concentration. Les ions Ca^{2+} et PO_4^{3-} forment plusieurs combinaisons ; trois d'entre elles sont insolubles dans l'eau (hypo-, méta-, et pyro-phosphate). Des composants qui apparaissent naturellement comme la blushite ($\text{CaPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et la whitlochite ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) voient leur solubilité diminuer avec l'augmentation du pH. Par ailleurs, tous ces paramètres peuvent influencer sur la croissance des bactéries, ce qui tend à augmenter le risque de colmatage.

I.3.3. Concentration en sel

La salinité de l'eau est un critère très important pour la caractérisation de la qualité des eaux d'irrigation. Les sels présents dans l'eau sont potentiellement colmatants s'ils rentrent en contact avec d'autres ions (fertilisants par exemple), ou des particules en formant un précipité.

C'est particulièrement le cas des sels contenant des cations divalents qui peuvent lier des particules minérales provenant des sols comme les argiles.

I.3.4. Concentration en colloïde

La coagulation à l'intérieur des réseaux d'irrigation est un phénomène possible, car les colloïdes sont omniprésents dans les eaux naturelles. On les trouve aussi bien dans les eaux de ruissellement que dans les eaux souterraines ou marines. Leur abondance et leur petite taille leur confèrent une très grande surface spécifique, et donc un rôle majeur dans tous les phénomènes d'interaction aux interfaces qui se produisent dans l'environnement aquatique.

Plus particulièrement, les colloïdes minéraux sont le siège principal des processus d'adsorption et de transport de matière organique dans l'eau. Ces réactions aux interfaces solide/liquide, varient avec les conditions du milieu et déterminent la stabilité des colloïdes en suspension. Ainsi, les phénomènes d'agrégation et de sédimentation d'agrégats organo-minéraux dans les milieux aquatiques naturels peuvent être à l'origine du transfert des matériaux de surface vers les eaux profondes (Fowler et Knauer, 1986). Ce qui est vrai dans le milieu naturel l'est aussi dans les systèmes d'irrigation. Leur rôle biogéochimique est donc d'un grand intérêt scientifique, dans la mesure où ils concentrent les différents micro-organismes et polluants de l'environnement aquatique (Grossart et Simon, 1993 ; Smith et al., 1992 ; Ploug et al., 1999 ; Schramm et al., 1998), et contribuent à leur flux vers les fonds marins (Grossart et Simon, 1998).

Les colloïdes minéraux proviennent essentiellement de l'érosion mécanique du sol, car ce substrat meuble est très sujet à l'érosion par les eaux de ruissellement. Pour assurer son rôle de réserve hydrique, de support pour la végétation et résister à l'érosion, le sol doit être structuré, poreux et les agrégats qui le forment de forte cohésion. La matière organique naturelle contribue à cette cohésion. Les exsudats racinaires riches en glucose permettent le développement dans la rhizosphère de colonies bactériennes, qui ont pour effet de réguler la stabilité hydrique et minérale du milieu. Les minéraux du sol résultant de l'altération de la roche originelle par pédogenèse (l'ensemble des processus physique, chimique et biologique) qui, en interaction les uns avec les autres, aboutissent à la différenciation des sols sont très variés : argiles, oxydes de fer, oxyde de manganèse, carbonates et minéraux primaires résiduels sont les plus abondants.

I.3.5. Cas des eaux marginales

Avec la diminution des ressources en eau de bonne qualité, l'irrigation à partir d'eau marginale tend à se développer (Broughton, 1995 ; Von Hoyningen Huene, 1994). Dans ces conditions, il y a un fort potentiel pour la croissance d'agents d'encrassement biologique (BCA: Biological Clogging Agent), comme les algues, les bactéries et les protozoaires dans les réservoirs alimentés par des eaux usées provenant des zones rurales (élevage intensif), et des zones urbaines (Adin et Sacks, 1991 ; Ravina et al., 1992 ; Sagi et al., 1995 ; Bucks et al., 1979 ; Ford, 1978). Quand une telle eau est utilisée dans des systèmes de micro-irrigation, un risque existe de voir les goutteurs se boucher rapidement (Adin et al., 1989 ; Adin et Alon, 1986 ; Bucks et Nakayama, 1984 ; Gilbert et al., 1979). L'impact des BCA se traduit par la réduction du débit d'émission et de l'uniformité de distribution sur le champ. D'autres chercheurs (Adin et Sacks, 1991 ; Hills et Tajrishy, 1995) ont montré que les BCA se lient chimiquement à l'eau. La sévérité de l'encrassement dépend aussi des qualités industrielles du goutteur, c'est-à-dire son type, ses dimensions, la section de passage de l'eau, la longueur du

cheminement, la présence ou l'absence de système de compensation de pression dans les goutteurs.

I.3.6. Tableau de Synthèse du lien qualité d'eau et risques de colmatage

Nakayama et Bucks ont établi en 1980 une grille permettant d'estimer les risques de colmatage :

Paramètres	Symbole	Unité	Degré de risque		
			Faible	Moyen	Elevé
Particules en suspension		ppm	< 50	50 – 100	> 100
pH	pH	1 à 14	< 7,0	7,0 - 8,0	> 8,0
Conductivité électrique	EC _w	dS/m	< 0,75	0,75 - 3,0	> 3,0
Matières totales dissoutes	TDS	mg/l	< 500	500 - 2000	> 2000
Sodium Adsorption Ratio	SAR	mg/l	< 3	3 – 9	> 9
Carbonate de Sodium Résiduel	RSC	mg/l	< 1,24	1,25 - 2,5	> 2,5
Alcalinité ou dureté		mg/l	< 120	120 – 200	> 200
Population bactérienne		ppm	< 10 000	10 000-50 000	> 50 000
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	mg/l	< 90	90 – 520	> 520
Chlore	Cl ⁻	mg/l	< 142	142 – 355	> 355
Bore	B	mg/l	< 0,5	0,5 - 2,0	> 2,0
Nitrate-Nitrogen	NO ₃ -N	mg/l	< 5	5 – 30	> 30
Fer	Fe	mg/l	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S	mg/l	< 0,2	0,2 - 2,0	> 2,0
Manganèse	Mn ₂ ⁺	mg/l	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5

Tableau I-3 : Les différents paramètres et leurs risques de colmater les goutteurs.

(Compilation de données issues des auteurs suivants : Ayers et Westcot, 1985 ; Couture, 2004 ; Hassan Farouk, 1999 ; Nakayama and Bucks, 1980 ; Pitts et al. 1990 ; Thomas, 2004)

Plusieurs recherches ont eu pour objectif de déterminer les causes du colmatage et de mettre en place des moyens de prévention (Oron et al, 1979 ; Adin, 1987 ; Adin et Sacks, 1991 ; Ravina et al., 1992 ; Tajirishy et al.,1994 ; Taylor et al., 1997). Les recommandations suivantes en sont tirées :

- la filtration de l'effluent et le lavage des filtres : il est préférable de réaliser une filtration en cascade (ou à plusieurs étages) du plus grossier au plus fin, en commençant par un filtre à sable ;
- la chloration peut éliminer les bactéries et certaines algues, or dans bien des cas, le colmatage est justement accru par la formation de biofilm lié à l'activité bactérienne. Il est à noter que le stockage dans des réservoirs tampons accroît ces phénomènes et la nécessité de recourir à la chloration ;

- le maintien d'un régime turbulent dans les réseaux pour éviter la formation de biofilms: leur développement est très lié aux propriétés de cisaillement de l'écoulement. Un cisaillement élevé, éventuellement obtenu au cours de cycles brefs peut contribuer à décoller le biofilm ;
- le lavage des lignes à grande vitesse ($>1\text{m/s}$) pour évacuer les accumulations de particules qui se créent pendant les périodes d'arrêt, et les biofilms éventuels ; il est préconisé de rincer les lignes en ouvrant leur extrémité ;
- l'optimisation de la géométrie ou l'architecture du labyrinthe de cheminement de l'eau dans les goutteurs qui détermine les zones et la cinétique du colmatage.

Plus tôt le colmatage est détecté, plus le traitement est facile. Un suivi de l'évolution de la pression et du débit (dans les filtres et les lignes de goutteurs) est tout à fait suffisant pour identifier un tel phénomène.

Chapitre II

Expérimentation sur une parcelle de pomme de terre à Pertuis (84)

Pour observer les phénomènes qui provoquent le colmatage des goutteurs, nous avons travaillé dans des conditions naturelles, dans lesquelles les caractéristiques de l'eau d'irrigation ne sont contrôlées que par filtration au niveau de l'exploitation. L'objectif de cette étude est d'observer la nature minérale et/ou organique de la matière colmatante, ainsi que la ou les zones préférentielles de colmatage (début/fin de ligne, ou aléatoire).

II.1. Matériels et méthodes

II.1.1. L'installation pilote sur le terrain

Nous analysons une parcelle de production de pomme de terre située dans le Sud-Est de la France, en région PACA, sur la commune de Pertuis. La parcelle est alimentée par des eaux provenant du canal EDF latéral à la Durance.



Figure II-1: Le site expérimental de Pertuis (84)

Ces eaux posent des problèmes épineux de colmatage des goutteurs aux agriculteurs qui utilisent la micro-irrigation. Quatre lignes de goutteurs (goutteurs GR intégrés, à cheminement long avec un débit de 2 l/h) sont installées comme indiqué sur Figure II-2 et Figure II-3, les arrosages sont programmés à raison d'une heure par jour à partir de 17 h, en même temps que ceux du reste de la parcelle. Deux lignes sont alimentées par de l'eau filtrée à 80 μ m comme le reste de la parcelle. Cette filtration est assurée par trois filtres à disque, pour assurer la continuité de la filtration. Afin de prévenir le colmatage de ces filtres, un mécanisme de rétro-lavage² se déclenche automatiquement dès que la perte de charge entre l'entrée et la sortie dépasse 0,6 bar.

Les deux autres lignes sont alimentées par de l'eau brute, c'est à dire non préalablement filtrée à 80 microns, dans le but d'observer un éventuel effet sur la cinétique du colmatage. L'irrigation de la parcelle est divisée en trois postes (Figure II-2), pilotés par des électrovannes volumétriques. Les goutteurs utilisés par l'exploitant sont intégrés dans des gaines jetables de marque **T-Tape®**, et qui sont différentes de nos goutteurs GR. Elles présentent les caractéristiques suivantes :

- débit : 0,98 l/h
- non autorégulantes
- diamètre : 16 mm
- pression de fonctionnement : 0,6 bar
- espacement entre les perforations : 30 cm

Chaque butte de pomme de terre est parcourue par une ligne de goutteur enterrée à environ 5 cm de profondeur (Figure II-1). Les buttes sont espacées de 70 cm et ont une longueur variant de 80 à 120 mètres.

² Lavage par inversion du sens de l'écoulement à l'intérieur du filtre

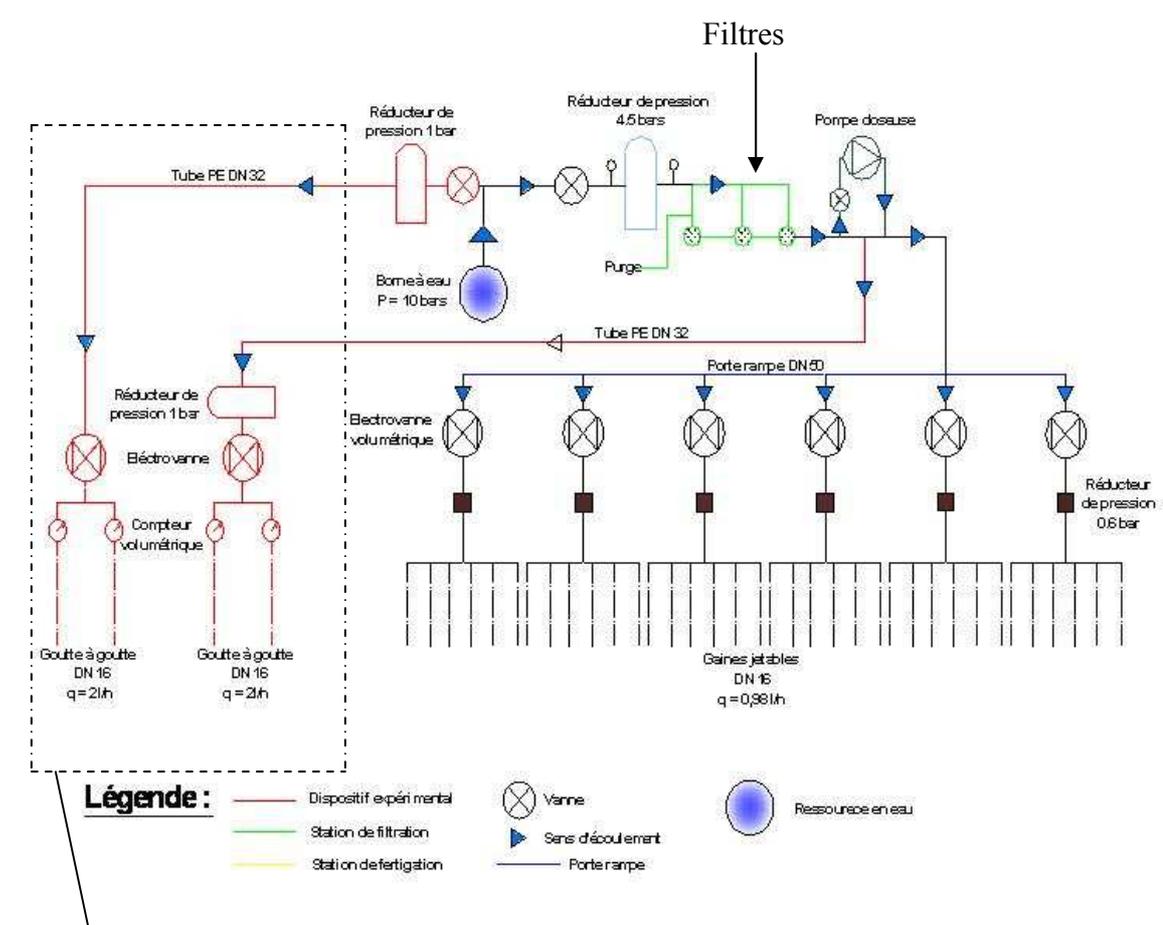


Figure II-2: Schéma technologique de l'ensemble de l'installation

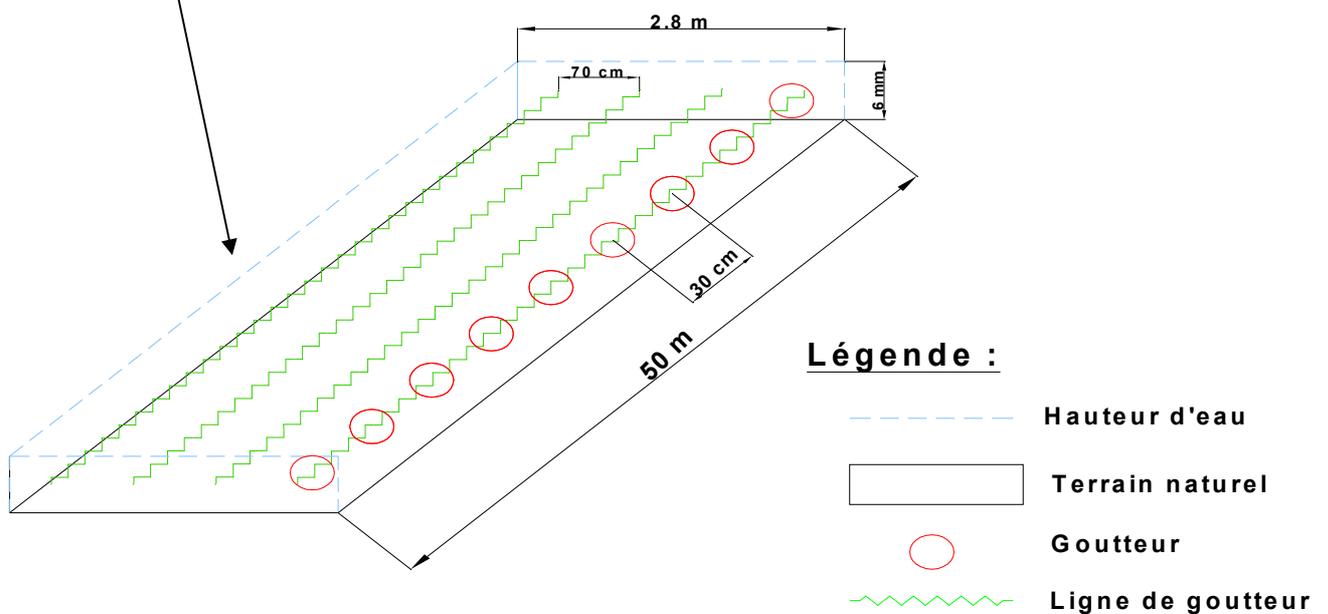


Figure II-3: Dispositif pilote expérimental à la parcelle

II.1.2. Caractéristique du goutteur

Pour analyser les causes et le processus de colmatage en irrigation, nous avons choisi de travailler avec des goutteurs GR (Figure II-4) intégrés dans un tube en PE (polyéthylène) de 16mm de diamètre, à cheminement long. Ils fonctionnent à une pression nominale de 1 bar et délivrent 2 l/h. Ils comportent une grille d'entrée jouant le rôle de filtre avant l'arrivée de l'eau à l'intérieur du labyrinthe. Ce labyrinthe est constitué de chicanes qui créent une perte de charge (Figure II-4). Le fonctionnement hydraulique de ce système doit être suffisamment homogène pour que le débit soit uniforme tout au long d'une rampe. Ce modèle de goutteur est le plus répandu dans le monde (une production de plusieurs milliards d'unités par an), grâce notamment à leur plus grande durabilité et au fait qu'il soit tombé dans le domaine public. Il est connu pour bien résister au colmatage mais reste peu tolérant aux variations de pression.



Figure II-4: Photo du goutteur GR et du labyrinthe utilisé pour étudier le colmatage en irrigation

II.1.2.1 La loi débit-pression

Des essais ont été réalisés afin de caractériser la loi débit pression donnant la sensibilité du goutteurs à la variation de pression appliquée en début de ligne (Eq I-1). Le débit est mesuré pour les dix goutteur à différentes valeurs de pression. On en déduit que la relation débit-pression suit une loi puissance d'exposant $x = 0.57$, en accord avec les caractéristiques des goutteurs non autorégulant. (Tableau I-1).

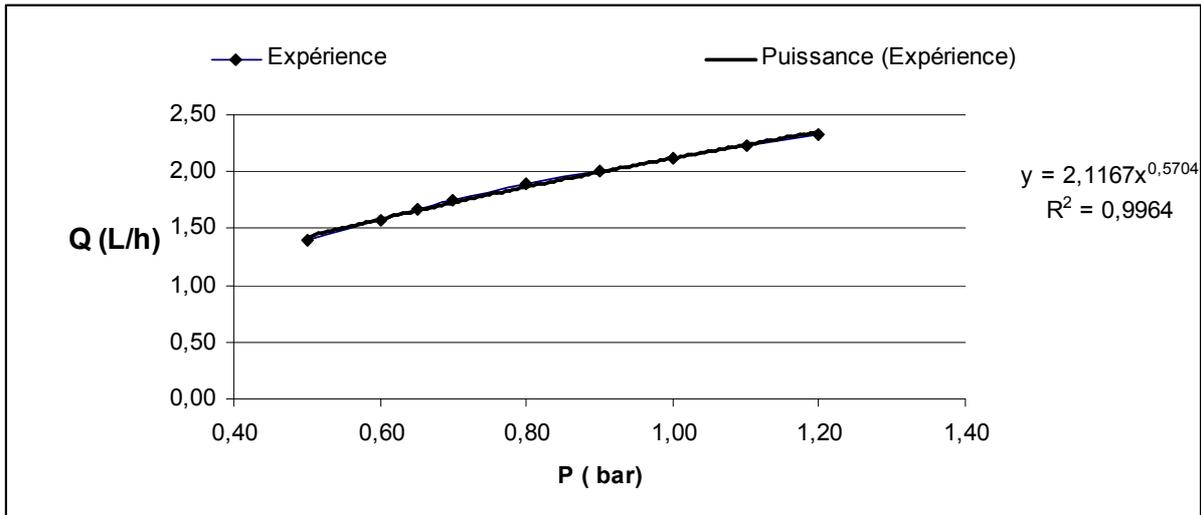


Figure II-5: courbe de débit-pression pour le goutteur GR

II.1.2.2 Modélisation de l'écoulement

Afin d'estimer les gammes de vitesses et de cisaillement pouvant influencer sur les mécanismes d'agglomération. Nous avons modélisé l'écoulement au sein du labyrinthe à l'aide du logiciel Fluent®. Des photos réalisées à l'aide d'un microscope Motic® sur des faces du goutteur ont permis de reproduire son labyrinthe dans le logiciel de dessin Gambit (Figure II-6 et Figure II-7)

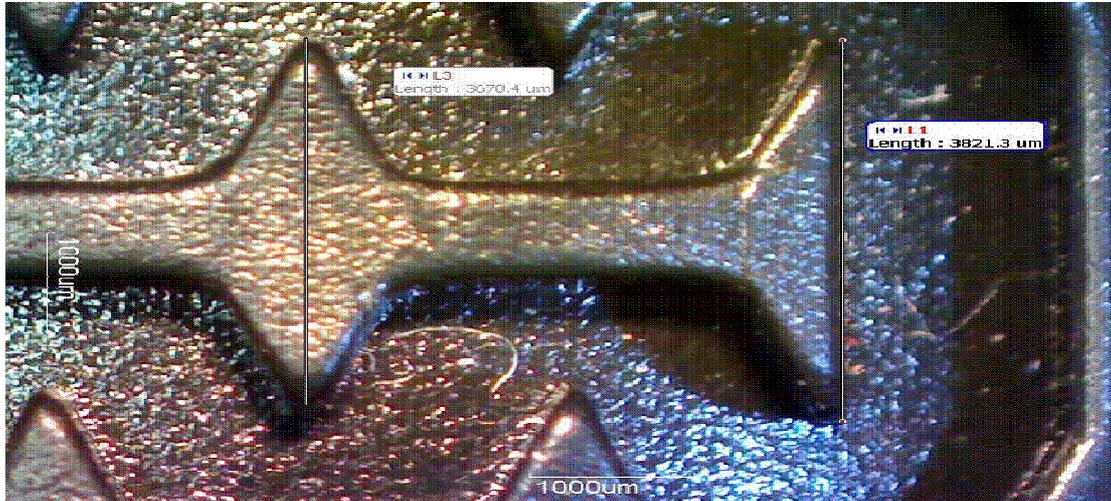


Figure II-6 : Photo du goutteur GR étudié

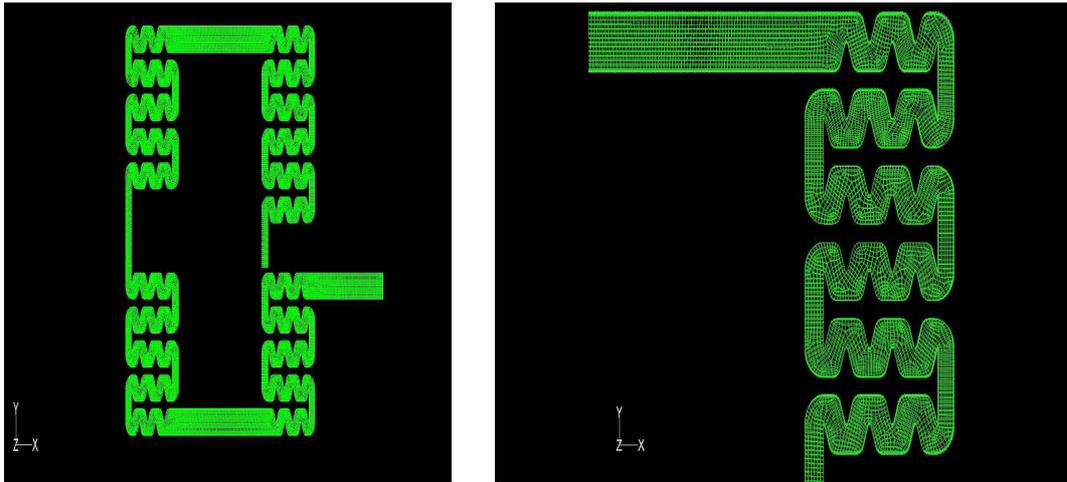


Figure II-7 : Maillage du labyrinthe effectué avec le logiciel Gambit

Des travaux de modélisation en 2D ont permis de caractériser plus précisément l'hydrodynamique de ces goutteurs. Bien que le nombre de Reynolds soit faible, de l'ordre de 600, ces simulations ont été réalisées avec un schéma turbulent. En effet, la faible section de passage (1mm^2) et la présence de chicanes favorisent une transition laminaire/turbulent. (Li et al. 2008 ; Jun et al., 2007 ; Zhang et al. 2007 ; Wei et al. 2006) à faible nombre de Reynolds. Les sections de passage du goutteur sont de l'ordre du millimètre et sont à la limite des micro-canaux (Hetsroni et al., 2005). Pour ce type d'écoulement certaines expériences mettent en évidence une transition laminaire/turbulent à plus faible Reynolds que la valeur conventionnelle pour les macro-échelles qui est de 2300 (Wu et Little, 1983 ; Pfund et al., 2000 ; Gui et Scaringe, 1995) alors que d'autres ne montrent aucun déplacement de cette transition (Qu et Mudawar, 2002 ; Celata et al., 2004 ; Sharp et Adrian, 2004).

Aussi l'écoulement, a été modélisé et les résultats sont présentés dans la Figure II-8 permettent de cartographier le champ de vitesse dans le labyrinthe et mettent notamment en évidence l'existence de zone de recirculation. En dehors de ces zones de recirculation, la vitesse atteint des valeurs de l'ordre de 2 m/s en début de labyrinthe.

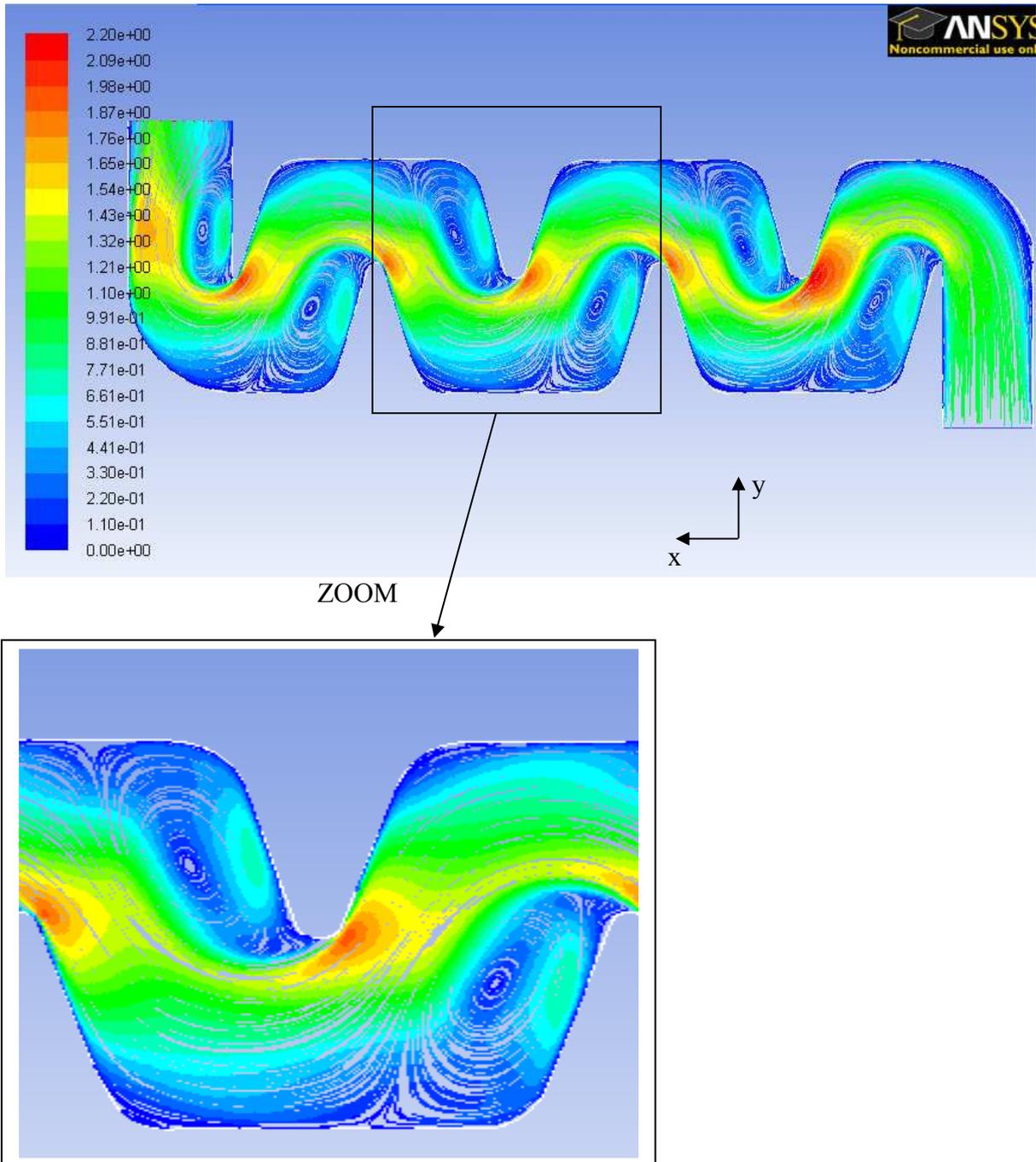


Figure II-8: Cartographie des lignes de courant dans le labyrinthe en fonction de leur vitesse, pour une circulation allant de droite à gauche.

Outre le champ de vitesse, il est intéressant d'estimer également les taux de cisaillement :

$$\tau = \frac{1}{2} \left| \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right| \quad \text{Eq II-1}$$

Où U et V sont respectivement les vitesses suivant les directions x et y.

Cette donnée nous sera utile par la suite car le cisaillement est une grandeur qui influe sur la croissance ou la fragmentation d'agrégats (Chapitre III).

Le champ de cisaillement représenté à la Figure II-9. Le code de couleur ne prend pas en compte les valeurs extrêmes au niveau des parois dont la valeur est de l'ordre de $4 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$. Cette figure permet de distinguer les zones de cisaillement maximales qui sont situées (pour plus de lisibilité) près des parois et à la pointe des chicanes $5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. La valeur moyenne du taux de cisaillement est de 1000 s^{-1} .

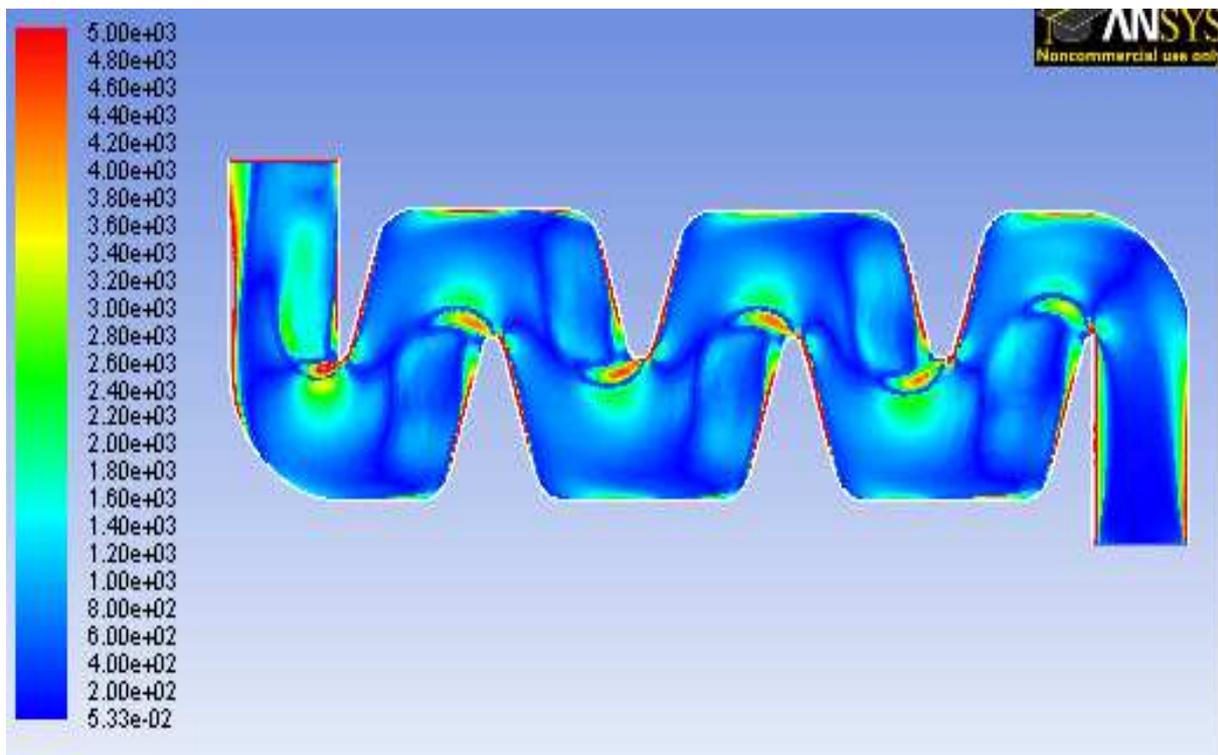


Figure II-9: Champs de cisaillement au sein du labyrinthe exprimé en s^{-1}

II.1.3. Mode opératoire

Afin de suivre au mieux l'évolution du colmatage sur le dispositif expérimental, une visite est effectuée chaque semaine afin de contrôler l'uniformité de la distribution d'eau. Pour cela, on utilise des récipients, type coupelle, une éprouvette graduée et un chronomètre.

Par ces mesures, on cherche à évaluer l'écart relatif entre les débits les plus faibles et le débit moyen des goutteurs. La procédure de contrôle est la suivante :

- Quatre mesures au minimum par rampe à répéter sur les quatre rampes différentes. Les seize mesures doivent prendre en compte les goutteurs de zones extrêmes (début et fin de ligne).
- On choisit sur chaque rampe, en dehors du premier et du dernier goutteur, des goutteurs qui se trouvent dans le premier tiers et dans le deuxième tiers de la rampe.
- Le choix des autres goutteurs doit être fait au hasard, à partir du plan du réseau et en repérant les numéros des goutteurs à tester.

II.1.3.1 Le protocole de mesure et d'échantillonnage hebdomadaire

Le récipient collecteur est placé sous les goutteurs choisis et marqués, en prenant soin de ne pas soulever les lignes de goutteurs, afin de ne pas perturber l'écoulement des gouttes le long du tuyau. La mesure est prise sur une durée de deux minutes. A l'issue on mesure le volume prélevé pour déterminer le débit du goutteur. La pression en bout de chaque ligne est mesurée par un manomètre digital branché à des tubings qui sont introduits dans la rampe. Cette mesure a pour but d'évaluer les pertes de charge dans la rampe. Des échantillons d'eau sont prélevés par ailleurs en plusieurs points, en début et fin de ligne pour les quatre rampes. Pour les prélèvements effectués en début de ligne, cela revient à étudier en amont et en aval de la filtration dans le but d'étudier l'effet de cette étape sur les caractéristiques de l'eau d'alimentation. Les différents échantillons d'eau récoltés sont plus ou moins chargés en particules. Celles-ci ont été quantifiées et caractérisées en termes de taille, potentiel électrique de surface et minéralogie.

II.1.3.2 Analyse granulométrique

Pour mesurer le diamètre des particules en suspension dans l'eau on utilise le granulomètre Mastersizer S (Malvern Instruments), dont la gamme de mesure est comprise entre 50 nm et 900 μm . La granulométrie laser est une technique basée sur la diffraction de la lumière. Elle est fondée sur la théorie de Fraunhofer qui s'appuie sur plusieurs hypothèses : les particules mesurées sont considérées sphériques, non poreuses et non opaques, de diamètre supérieur à la longueur d'onde, animées d'un mouvement aléatoire, et diffractant la lumière avec la même efficacité quelle que soit leur taille. Le faisceau lumineux incident est produit par un laser He-Ne, de longueur d'onde égale à 633nm, ce dernier est élargi et traverse un collimateur afin d'obtenir un faisceau parallèle de quelque millimètres de diamètre. Il éclaire une cellule de mesure où circule l'échantillon. Lorsque le faisceau lumineux du laser rencontre une particule, cette dernière le diffracte avec un angle appelé angle de diffraction qui dépend de son diamètre. Les plus petites particules diffractent la lumière à des angles plus grands que les plus grosses particules. 42 détecteurs répartis sur une gamme d'angle autour du faisceau incident permettent de collecter l'intensité de lumière totale diffractée par les particules (Figure II-10). Un logiciel (Malvern Instruments) permet de transformer ces données brutes en distribution granulométrique volumique des particules. Plusieurs valeurs statistiques peuvent être exploitées pour caractériser cette distribution. Le diamètre médian, appelé D50 est plus communément utilisé.

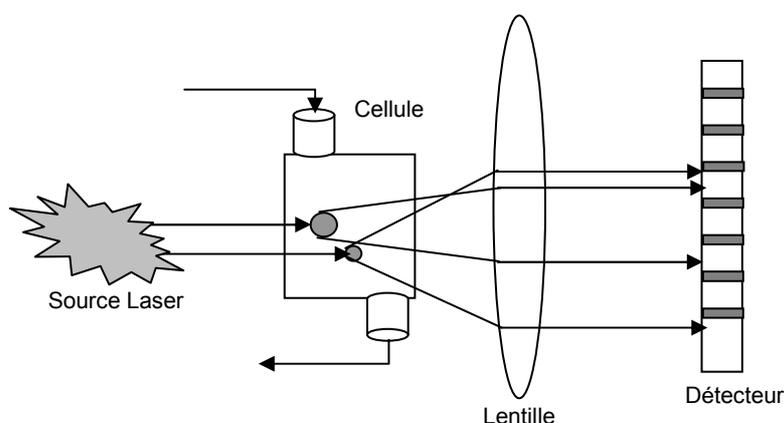


Figure II-10 Principe de la mesure granulométrique

II.1.3.3 Protocole de mesure de granulométrie par diffraction laser

On place un échantillon dans un Becher sous agitation, d'un volume d'environ 200ml. Une pompe envoie la suspension dans la cellule de mesure du granulomètre par un système de tubings (Figure II-11). Au bout d'un temps de mesure de cinq secondes, on obtient une courbe sur une échelle semi logarithmique, avec en abscisse la taille des particules (en μm) et en ordonnée le pourcentage volumique associé à chaque classe de taille, ainsi qu'un tableau de l'ensemble des mesures enregistrées. Le logiciel donne la valeur médiane D50 des tailles obtenues. On réalise environ 5 mesures par échantillon, afin de pouvoir dresser une courbe représentant la moyenne des valeurs obtenues. Ce protocole permet d'éliminer les prises de mesures qui sont incohérentes. Ces mesures erronées peuvent être dues à un bruit extérieur, une bulle d'air ou encore une impureté. Leurs caractéristiques sont en général très différentes des échantillons mesurés, ce qui permet de retirer ces résultats de l'analyse.

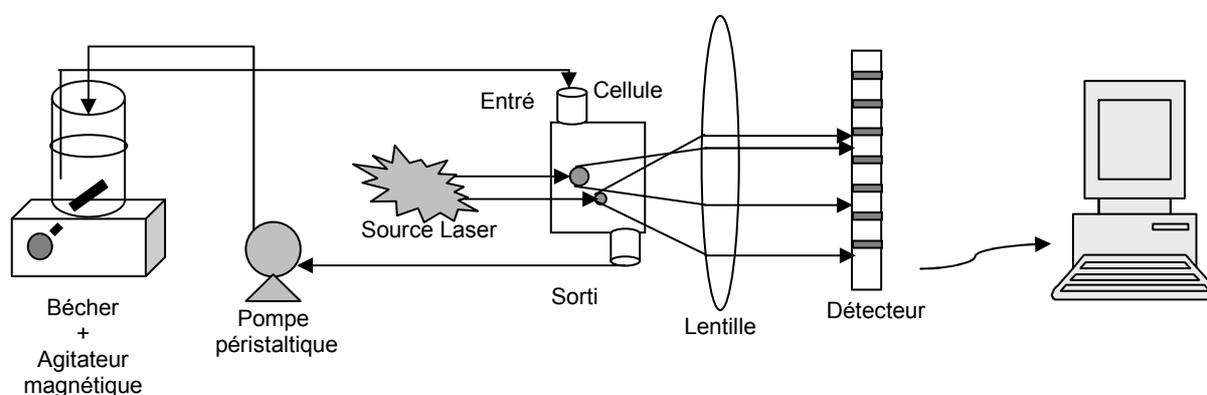


Figure II-11 : Schématisation de la mesure granulométrique de la suspension

II.1.3.4 Principe de la diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X permet d'identifier les phases cristallisées d'un échantillon (minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés). Elle permet de reconnaître des produits ayant la même composition chimique brute, mais une forme de cristallisation différente, par exemple de distinguer les différentes silices (qui ont toutes la même formule brute SiO_2 : quartz, cristobalite...), ou les différentes alumines (qui ont toutes la même formule brute Al_2O_3).

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplanie dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une pastille solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X diffractés en fonction de l'angle de diffraction. La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelques Angström), les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, on va donc avoir un flux important de photons X, ou au contraire très faible. Ce phénomène a été découvert par Max von Laue (Prix Nobel en 1914), et longuement étudié par sir William Henry Bragg et son fils sir William Lawrence Bragg (prix Nobel commun en 1915). Les

directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées « pics de diffraction », peuvent être déterminées très simplement par la formule suivante, dite loi de Bragg :

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{Eq II-2}$$

avec

- d = distance interréticulaire, c'est-à-dire distance entre deux plans cristallographiques ;
- θ = demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur) ;
- n = ordre de réflexion (nombre entier) ;
- λ = longueur d'onde des rayons X.

II.2. Résultats

Nous avons utilisé une parcelle de production de pomme de terre pour pouvoir suivre l'évolution du colmatage dans le temps lors d'une campagne d'irrigation, à savoir du mois de mai jusqu'à la fin du mois de juillet pour ce type de production. Pour cela, nous décidons d'utiliser sa ressource en eau (à savoir l'eau du canal de la Durance), ainsi que son système de filtration, afin de reproduire les conditions d'une irrigation en plein champs traditionnelle.

II.2.1. Uniformité de la distribution de débit dans les goutteurs

Nous avons réalisé un premier contrôle au champ suite à la mise en place de l'installation. Nous obtenons de très bonnes valeurs d'uniformité, en effet sur les deux lignes de goutteurs mesurées, le coefficient d'uniformité est de 98,6 % et de 99,5% pour l'installation alimentée en eau filtrée. Nous débutons donc notre expérimentation avec une uniformité de distribution quasiment parfaite et un débit légèrement supérieur au débit nominal (2 l/h) annoncé par le constructeur.

L'évaluation de l'uniformité spatiotemporelle de la distribution de l'eau repose en partie sur l'analyse du coefficient d'uniformité (DU). Ce coefficient correspond au rapport du débit moyen des plus faibles mesures (moyenne sur le quart de l'effectif \bar{q}_{\min}) au débit moyen de l'ensemble des mesures (\bar{q}) :

$$DU = 100 * \frac{\bar{q}_{\min}}{\bar{q}} \quad \text{Avec } \bar{q} : \text{moyenne de l'ensemble des } n \text{ mesures}$$

et \bar{q}_{\min} : moyenne des $\frac{n}{4}$ mesures des débits les plus faibles

Une bonne uniformité se caractérise par une valeur du DU élevée, proche de 100%

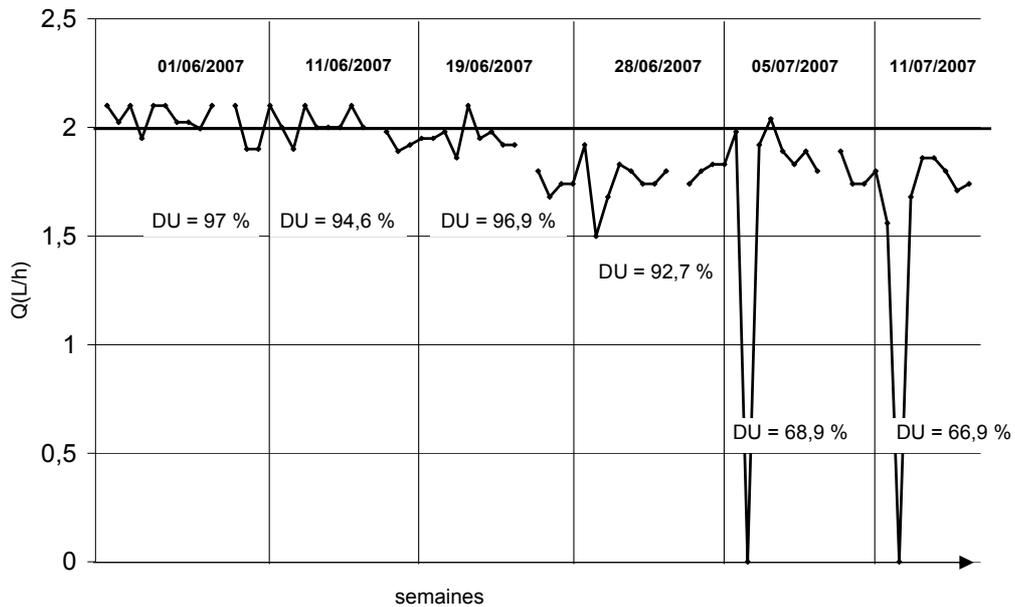


Figure II-12: Evolution temporelle des débits avec des eaux brutes (sans filtration)

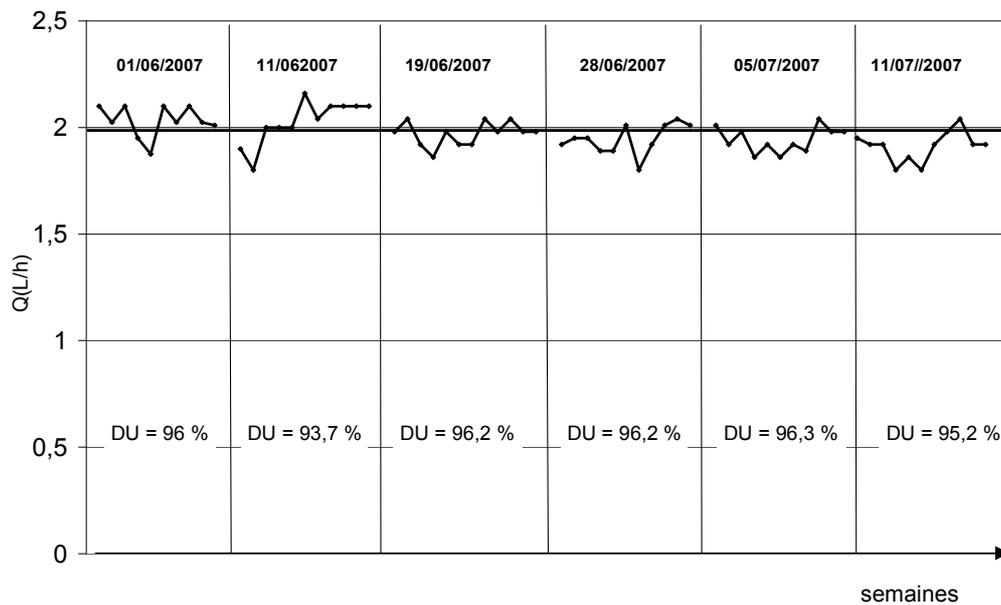


Figure II-13: Evolution temporelle des débits avec des eaux filtrées

Les données antérieures au 29/06 reportées en Figure II-12 et Figure II-13 représentant les évolutions temporelles des débits des lignes recevant respectivement des eaux brutes et des eaux filtrées, mettent en évidence une variation de l'ordre de + ou - 5% par rapport au débit nominal pendant cette période. Cette variation est normale, elle est généralement due à la qualité de fabrication du produit, mais aussi à de possibles fluctuations de pression sur le réseau en amont de l'installation, ou du fait des pertes de charge en amont. Les mesures réalisées le 11 juin 2007 sur les lignes filtrées montrent que les deux premiers goutteurs ont

des débits nettement inférieurs aux autres et ceci n'est pas observable sur les autres jours de relevé. On peut vraisemblablement relier cette chute des débits à une baisse momentanée de pression. A partir du 5 juillet 2007, soit après un mois d'apports d'eau journalier, l'ensemble des goutteurs en eaux brutes présente un débit de distribution inférieur au débit nominal (Figure II-12) et environ $\frac{3}{4}$ des goutteurs en eaux filtrées (Figure II-13). En revanche, on conserve une très bonne uniformité de distribution d'eau. En effet le DU demeure supérieur à 95 %, on peut donc supposer que l'obstruction des organes de distribution est homogène pour les différents goutteurs.

Tout au long de l'expérimentation, nous avons obtenu de très bonnes valeurs d'uniformité de la distribution d'eau (sur la partie eau filtrée), elles sont toutes supérieures à 90%, et d'après Chossat, (1995), il n'est pas nécessaire d'intervenir sur le réseau. Etant donnée la baisse du débit observé, on en déduit que le coefficient d'uniformité seul, ne fait pas ressortir tous les aspects des phénomènes de colmatage pour peu qu'ils soient homogènes, le DU seul n'est donc pas un critère suffisant.

II.2.2. Variation du débit

C'est pour cette raison, qu'en complément du DU, on calcule un pourcentage de variation des débits de distribution par rapport au débit initial (Ec) :

$$Ec = 100 * \frac{(q - q_n)}{q_n} \text{ avec}$$

q : Débit mesuré (l/h)

q_n : Débit nominal (dans notre cas : 2 l/h)

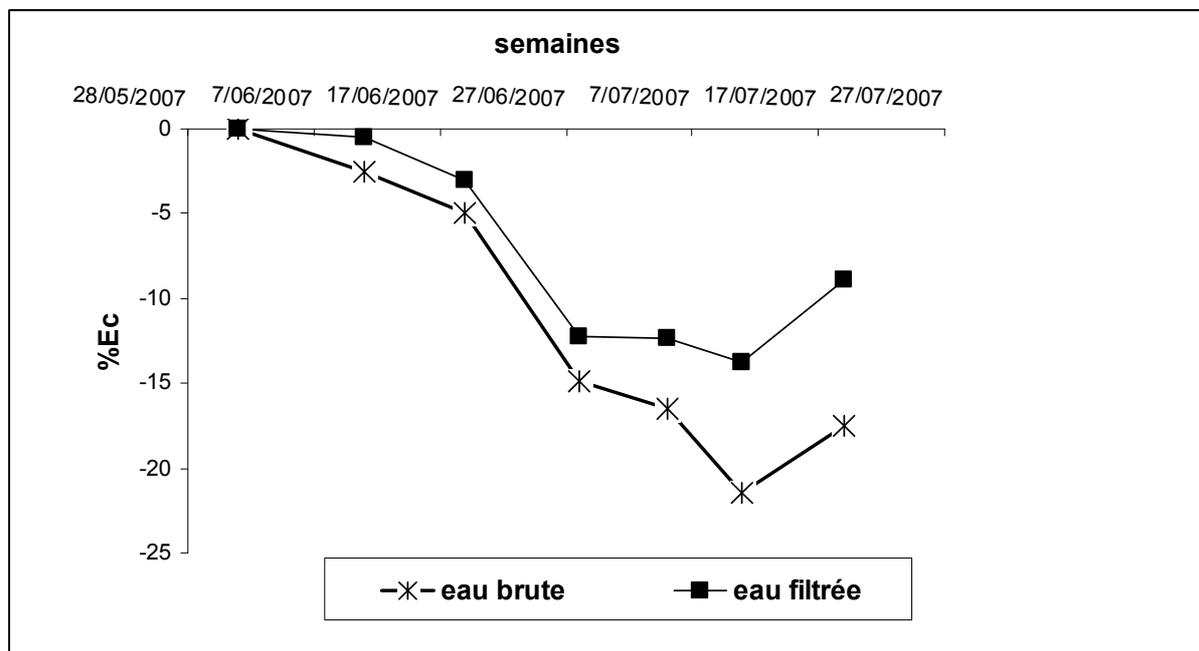


Figure II-14: Evolution temporelle de l'Ec pour des eaux filtrées et non-filtrées

Pour les eaux brutes (Figure II-14), l'évolution temporelle de l'Ec montre une chute des débits qui atteint 22% la cinquième semaine. On note une accélération de la chute de ces débits lors de la troisième semaine, celle-ci est à relier aux événements orageux survenus lors de cette période qui provoquent la mise en suspension d'un plus grand nombre de particules qui finissent dans les cours d'eau et canaux, et donc favorisent l'obstruction des goutteurs. En

eaux filtrées, on observe une diminution de 14% par rapport au débit nominal à la fin de la période d'irrigation. Cette variation est liée au colmatage partiel des goutteurs d'irrigation.

II.2.3. L'effet de la filtration sur le colmatage des goutteurs

On voit sur la Figure II-14 que la station de filtration a permis de réduire le colmatage de l'installation sur la période de deux mois d'expérimentation. Néanmoins, il est intéressant de constater que les phénomènes de colmatage se produisent de la même façon avec des intensités différentes pour une installation alimentée par des eaux filtrées et non filtrées. Il apparaît donc que la station de filtration qui élimine les particules de plus de 80 μm n'a fait que repousser l'échéance du colmatage de l'installation, qui semble inévitable au vu de la tendance de la courbe.

Même munie d'une station de filtration relativement performante, cette dernière ne peut pas protéger intégralement les goutteurs sur le long terme. En effet, rappelons que pour valoriser au mieux la production, le calibre des pommes de terre doit être homogène. Les 5% de débit apportés en moins en moyenne au terme d'une seule campagne d'irrigation, peuvent ne pas avoir d'effet sur la production, mais en revanche la variabilité de la distribution se traduira par une variabilité plus grande des tailles de tubercules, ce qui pourra réduire le prix de vente du produit. De plus, on peut prévoir que ce phénomène s'amplifiera l'année suivante, et donc de ce fait, pourra s'accumuler au fil des années.

II.2.4. L'effet de la purge sur l'intensité du colmatage

La purge est une technique qui permet d'évacuer l'eau en bout de ligne, soit manuellement soit avec une électrovanne. Comme nous avons pu le voir Figure II-12 un goutteur alimenté par des eaux non filtrées s'est colmaté totalement à compter du 5 juillet. Ce dernier est placé en fin de ligne et celle-ci n'a jamais été purgée. Pour faire ressortir cet effet, nous avons comparé trois goutteurs qui se trouvent à des positions différentes d'une même ligne ou en fin d'autre ligne ayant subi une purge.

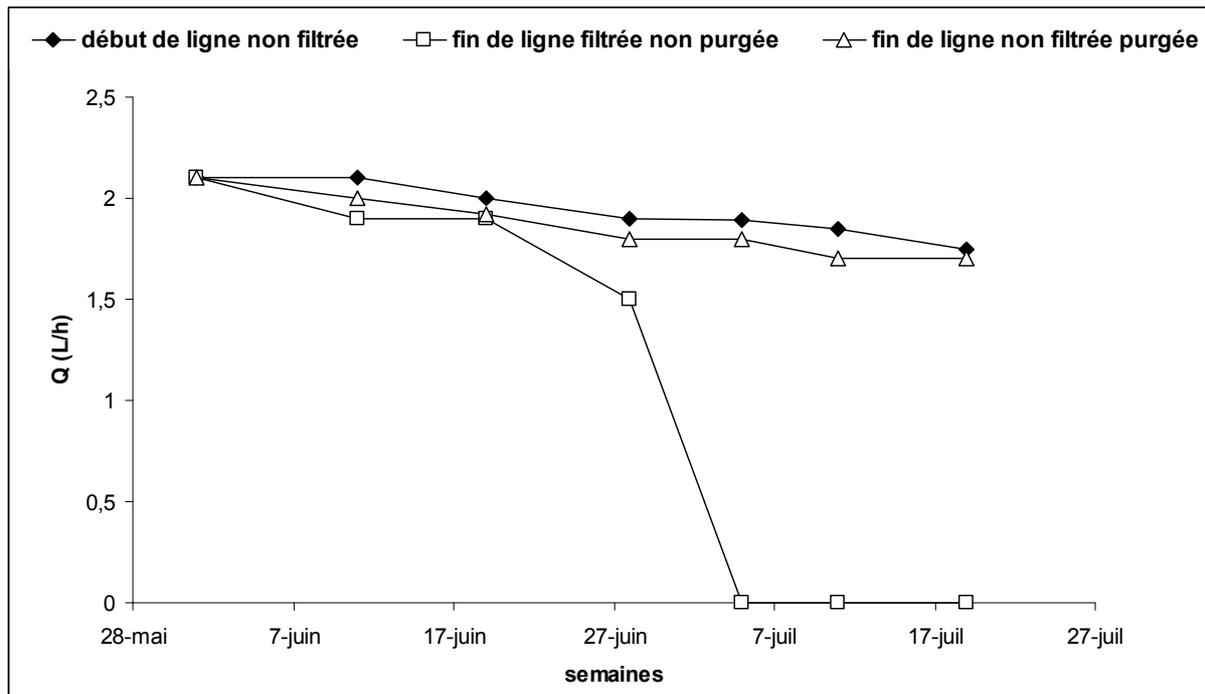


Figure II-15 : Effet d'une purge sur les goutteurs situés en fin de ligne

La Figure II-15 montre clairement l'effet d'une purge sur le maintien du débit de distribution des goutteurs situés en fin de ligne. En effet, le fait de chasser les particules chaque semaine a permis de conserver un débit de distribution, certes 15 % en dessous du débit initial en fin de campagne, mais on a surtout prévenu le bouchage complet des organes d'irrigation. De plus, on constate que l'obstruction totale du dernier goutteur non purgé, est survenue suite aux importants événements orageux du 1^{er} juillet. On peut également penser que la chute de débit sur ce même goutteur observé lors des relevés du 28 juin (1,5 l/h), peut être due à une forte charge en particules des eaux de la Durance, car ces orages ont frappé une semaine plus tôt au niveau du barrage de Serre Ponçon qui alimente le canal.

II.2.5. Mesure granulométrique

II.2.5.1 Variabilité de la qualité des eaux d'irrigation après filtration

Il est important de pouvoir apprécier la variation en charge de particules des eaux d'irrigation, car elle influence directement les risques de colmatage. Les eaux de chaque prélèvement hebdomadaire ont été analysées au granulomètre laser (Figure II-16). L'obscurité, qui est corrélée à la charge globale en particule contenue dans l'eau, est reportée avec le D50 de la distribution de tailles volumique de ces particules.

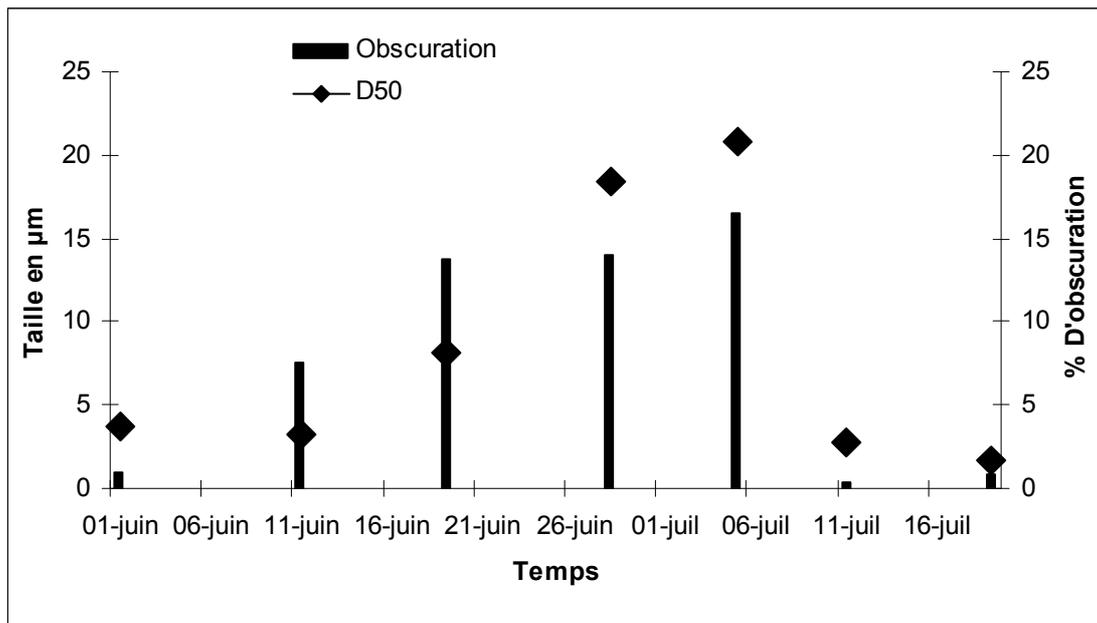


Figure II-16 Variabilité en charge de particule de la ressource en eau

On peut constater une forte variabilité de la teneur en particules des eaux d'irrigation au cours du temps (Figure II-16). En effet, on observe que l'obstruction et la taille des particules augmente progressivement jusqu'au 6 juillet, qui présente une obstruction de 16,5%. En fin de campagne, on remarque une inversion de la tendance car, nous avons moins de 1% d'obscuration. Cette forte amplitude est due en grande partie aux aléas climatiques. En effet, après une période de sécheresse, les fortes pluies, du 1 au 6 juillet, ont érodé les sols du bassin versant de la Durance, et entraîné les particules avec les eaux de ruissellement. Celles-ci aboutissent dans les canaux d'irrigation. On remarque également que le D50 des particules est corrélé avec le pourcentage d'obscuration. En effet, lorsque l'eau est fortement chargée, on retrouve une part plus importante de grosses particules. Au vu de ce graphique, on comprend pourquoi après un événement orageux, les risques de colmatage des systèmes d'irrigation augmentent. Le facteur prépondérant est moins la taille des particules (qui varie assez peu) en regard de la taille de la section de passage de l'eau dans le goutteur, que leur concentration. On observe d'ailleurs que le lendemain d'une pluie, les cycles de rétro-lavage des filtres sont plus nombreux. Dans le cas évoqué le laps de temps entre cycle est divisé par six par rapport à la situation d'une période sans pluies d'orage, d'où la nécessité de l'automatiser.

II.2.5.2 Analyse granulométrique des particules

La Figure II-17 montre les distributions de taille de particules sortant en début ou fin de lignes à partir d'eaux filtrée ou brute. Il apparaît que la qualité de l'eau est fortement variable et que l'effet de la filtration n'est pas toujours celui attendu.

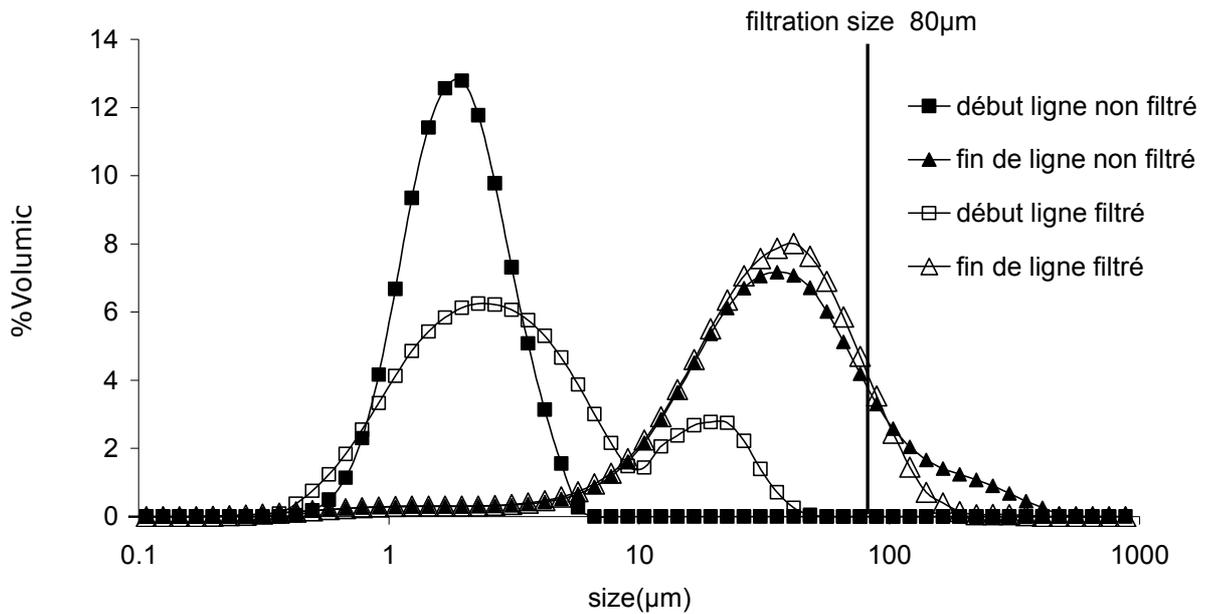


Figure II-17: Evolution de la taille des particules entre le début et la fin de la ligne

En entrée de ligne, dans les eaux filtrées, les distributions de tailles de particules mesurées sont inférieures au seuil de coupure de 80 μm de la station de filtration, s'étalant entre 0,3 et 30 μm . Toutefois l'eau non filtrée ne présente pas une famille granulométrique plus grossière. Au contraire, celle-ci est centrée sur 2 μm et est exempte de la famille de taille de 20 μm observée en sortie de filtration. Cet effet inattendu de la filtration peut être dû d'une part au relargage dans l'eau filtrée de particules de 20 μm préalablement déposées sur le filtre, et d'autre part à la charge de l'eau brute particulièrement faible du fait des conditions météorologiques lors de ce prélèvement.

En fin de ligne, les distributions de tailles mesurées s'avèrent beaucoup plus grossières, avec des valeurs maximum autour de 200 μm quel que soit le type d'eau analysé. Cette augmentation de la taille mesurée d'un bout à l'autre de la ligne met en évidence un phénomène d'agrégation des particules se produisant pendant leur temps de séjour dans la ligne. Les causes de ce mécanisme d'agrégation sont encore indéterminées, mais la stagnation des particules dans la rampe sous saturée en eau pendant les périodes de repos, et sous forte radiation solaire est probablement à incriminer.

II.2.5.3 L'influence de la purge sur la granulométrie des particules

Au fil des prélèvements, nous avons constaté une accumulation des particules au bout des lignes de goutteurs. C'est pourquoi nous avons analysé la taille des particules avant et après une purge (Figure II-18) de l'installation. On confirme l'observation précédente quant à la présence en fin de ligne de particules de tailles supérieures au seuil de coupure du filtre. En étudiant ces graphiques, on peut constater que la taille des particules mesurées est plus élevée avant purge qu'après. On peut donc penser qu'en se déposant en bout des lignes de goutteurs, les particules forment des amas de grande taille. Ceux-ci sont remis en mouvement lors de chaque apport d'eau et peuvent cheminer au travers du labyrinthe du goutteur. Au contraire, lorsqu'une purge est opérée en bout de ligne, le dépôt de particules stagnantes est évacué par la forte pression, et ce processus de colmatage est éliminé.

Ces phénomènes sont intéressants, car ils peuvent expliquer en partie pourquoi un des goutteurs installés et n'ayant subi aucune purge ne débite plus d'eau en fin de campagne d'irrigation.

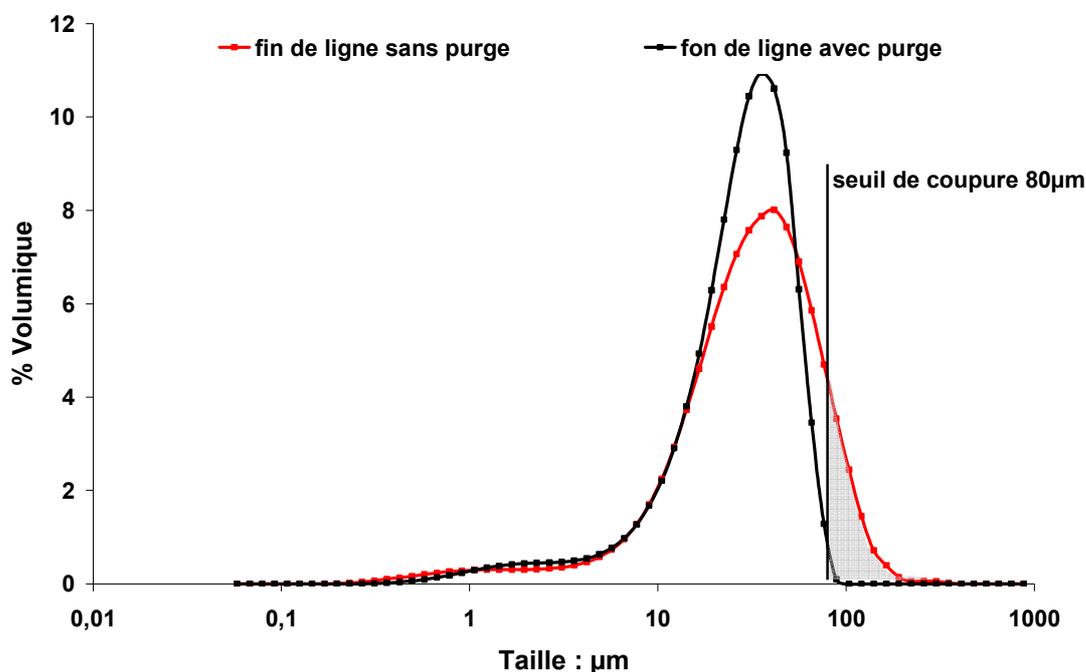


Figure II-18 : Taille des particules en eau filtrée en fin de ligne, avec et sans purge

II.2.6. Caractérisation des espèces en suspension dans l'eau

Des prélèvements d'eau sont effectués en différentes positions de la ligne du système, afin de caractériser la minéralogie de la matière qui se trouve en suspension. La diffraction par rayon X (Figure II-19) révèle des pics intenses et une ligne de base plane, caractéristique d'une matière en suspension essentiellement minérale et bien cristallisée. On y décèle l'existence de deux types d'argiles prédominantes, la kaolinite et la smectite. Cette dernière est une argile 2:1 dite gonflante, dont l'organisation inter particulaire est particulièrement sensible aux phénomènes d'hydratation / déshydratation, et est bien connu pour sa faible conductivité hydrique en cas de formation en couche dense. Ceci est en bon accord avec les observations faites sur les lignes de goutteurs, et appuie l'hypothèse d'un rôle prépondérant des particules déposées dans la ligne sur le processus de colmatage. Il semble donc que le colmatage physico-chimique prédomine le colmatage biologique dans cette situation particulière.

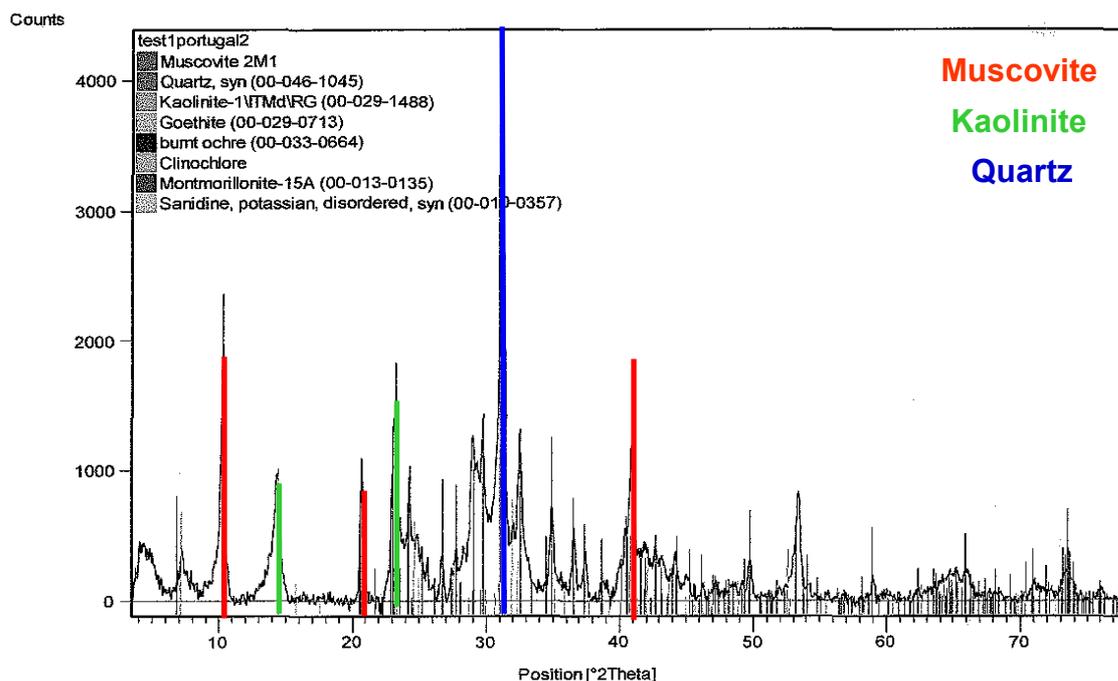


Figure II-19 : Minéralogie de l'eau de purge déterminée par diffraction des rayons X

II.3. Conclusion

Des mesures de débit sont effectuées sur les goutteurs de chaque ligne se trouvant au même niveau (dans l'ordre début-fin). Ces mesures mettent en évidence l'intensité du colmatage et elles révèlent un colmatage aléatoire des goutteurs.

Des prélèvements d'eau sont effectués en parallèle en différents points du système, afin de caractériser le comportement de la matière qui se trouve en suspension. La diffraction par rayon X révèle l'existence de deux types d'argile prédominants, la kaolinite et la smectite. Il apparaît que colmatage physico-chimique prédomine le colmatage biologique. Parallèlement, les mesures par granulométrie laser mettent en évidence une augmentation des tailles de particules mesurées entre le début et l'extrémité de la ligne qui est à relier avec le phénomène d'agrégation et de déposition de ces argiles dans la ligne.

Ces résultats montrent que le colmatage des organes d'irrigation peut être fortement lié à la qualité d'eau et à la nature de la matière qui s'y trouve, à savoir leur charge et éventuellement leurs diamètres. Suite au résultat granulométrique l'hypothèse d'une agglomération/déposition des particules est vérifiée.

L'installation d'un système de filtration en micro-irrigation est indispensable pour le bon fonctionnement des rampes durant toute la période d'irrigation et pour aller dans le sens d'une durabilité relativement élevée pour ce type d'eaux, mais il ne prémunit pas complètement contre les colmatages. Cette efficacité des systèmes, rampes + goutteur peut être augmentée si on applique des purges régulièrement en fin de rampes par des vannes qui seront automatisées, en particulier à la suite de pluies orageuses sur le bassin versant.

D'après l'expérience de l'agriculteur chez qui nous avons travaillé, on peut aussi diminuer le risque de colmatage en augmentant les fréquences d'arrosage c'est-à-dire en étalant sur la journée la quantité d'eau quotidienne habituellement apportée en une fois. Cela limite en effet l'accumulation et le dépôt (minéral et bactériologique) dans les rampes.

Aux vues de ces résultats, il apparaît essentiel d'étudier plus en détail quels sont les facteurs environnementaux qui favorisent l'agrégation des particules argileuses et ses conséquences sur le colmatage des goutteurs.

Chapitre III

LE PROCESSUS D'AGREGATION Et BILAN DE POPULATION

Les expériences in-situ ont révélé que le colmatage était lié à l'agglomération de particules argileuses. Il apparaît donc nécessaire de détailler ces phénomènes afin de mettre en œuvre des expériences pour tester l'impact de ces processus sur le colmatage des goutteurs.

La turbidité d'une eau est principalement causée par des particules très petites, (Tableau III-1) dites particules colloïdales maintenues en suspension. Ces particules, qui peuvent rester en suspension dans l'eau durant de très longues périodes sans sédimenter ont une taille de l'ordre du micron. Lorsque ces particules colloïdales ont des interactions répulsives entre voisines, celles-ci n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres et la dispersion colloïdale reste stable. La stabilité de ces particules en suspension dépend de leur nature et des propriétés physico-chimiques de l'eau. Si au contraire les caractéristiques du système induisent des interactions entre particules de nature attractive, les particules peuvent se coller alors les unes aux autres et former des agrégats qui sont ensuite éliminés de la solution par sédimentation gravitaire lorsque leur taille est suffisante. Dans le cas de notre étude, ces particules peuvent colmater les dispositifs d'irrigation.

<i>Diamètre des particules (μm)</i>	<i>Etat</i>	<i>Exemple</i>
<i><0.001</i>	<i>Etat dissous</i>	<i>Molécules organiques</i>
<i>0.001 – 1</i>	<i>Etat colloïdal</i>	<i>Argile, Bactérie</i>
<i>>1</i>	<i>Solides décantables</i>	<i>Limon, Sables, Pollen</i>

Tableau III-1 : Ordre des grandeurs des particules susceptibles d'être présentes dans les eaux d'irrigation

Dans le cadre de notre étude pour approcher le comportement de ces particules, il est nécessaire de connaître :

- Les conditions physico-chimiques qui conduisent à la déstabilisation des particules, et qui peuvent conduire à l'agglomération ;
- La façon dont elles s'agglomèrent, et l'influence de la structure de l'agrégat formé sur ses propriétés de sédimentation ;
- La cinétique de l'agrégation en lien avec les caractéristiques de l'écoulement du fluide transporteur.

III.1. Conditions de stabilité colloïdale

La formation des agrégats dépend de la possibilité de collage entre les particules initialement dispersées dans la phase liquide. Dans un système liquide-solide, deux grandeurs principales entrent en jeu et peuvent influencer sur le collage lors du rapprochement des particules :

- les forces de van der Waals ;
- les forces électrostatiques.

III.1.1. Les forces de Van der Waals

Les forces attractives intermoléculaires connues sous le nom de forces *de van der Waals*, englobent un ensemble de forces qui sont :

- les forces d'induction ou forces de Debye-Van der Waals ;
- les forces d'orientation ou forces de Keesom-Van der Waals ;
- les forces de dispersion ou forces de London-Van der Waals.

Les deux premières forces (orientation et induction) sont d'origine électrostatique ; elles interviennent si l'une des molécules est polaire. Les forces de dispersion agissent indépendamment de la polarité. En termes d'énergie, l'expression des interactions entre deux corps de rayon r_1 et r_2 , distants d'une longueur d , entre leurs surfaces est (Hamaker 1937) :

$$V_{vdw}(d) = -\frac{A}{12} \left[\frac{y}{x^2 + xy + x} + \frac{y}{x^2 + xy + x + y} + 2 \ln \left(\frac{x^2 + xy + x}{x^2 + xy + x + y} \right) \right] \quad \text{Eq III-1}$$

Où A est la constante de Hamaker, $x = d/2r_1$, et $y = r_2/r_1$

III.1.2. La polarité

La polarité est la caractéristique d'une molécule dont les charges négatives et positives sont concentrées les unes à l'opposé des autres, aux deux extrémités de la molécule. L'électronégativité est à l'origine de la polarité de certaines molécules. Une molécule polaire est caractérisée par son moment dipolaire : plus celui-ci est élevé, plus la molécule est polaire (il est nul pour les molécules apolaires). La polarité (ou non) des groupements de surface d'une particule influe sur son affinité avec le milieu dispersant. Les surfaces polaires ont une grande affinité pour les solvants polaires, et inversement. Dans le cas de l'eau, la polarité de la molécule H_2O implique que les surfaces hydrophiles soient polarisées (exemple : oxydes métallique). Au contraire, une surface non polarisée est typiquement hydrophobe (exemple : charbon).

III.1.3. Répulsion des double-couche électriques

Une particule chargée immergée dans un électrolyte, induit par électro-neutralisation l'organisation d'un nuage ionique de contre-ions qui l'enveloppe. Ce nuage se structure en une double couche (Figure III-1) :

- La couche de STERN est constituée des contre-ions adsorbés sur la surface de la particule.
- La couche diffuse est composée de contre-ions non adsorbés. Leur concentration y décroît exponentiellement et de manière concentrique en s'éloignant de la particule (Figure III-2).

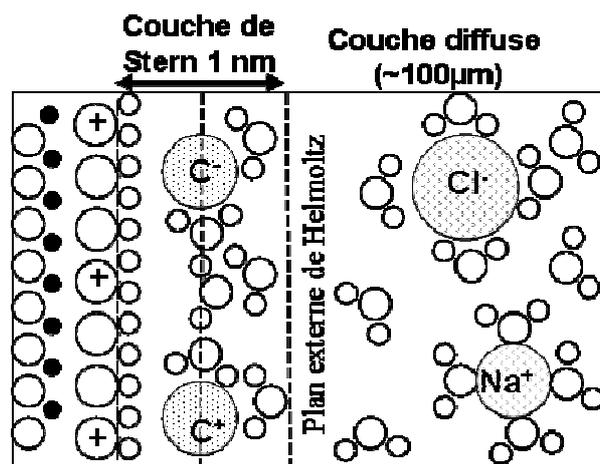


Figure III-1: Distribution des contre-ions à la surface d'une particule chargée en suspension selon le modèle de la double-couche électrique.

La limite entre les deux couches est appelée plan externe de Helmholtz. La distribution des contre-ions dans la double couche diffuse est modélisée par l'équation de Poisson-Boltzmann

(Eq III-2) (Barrow, 1973), où le solvant est considéré comme un continuum idéal de constante diélectrique (ϵ)

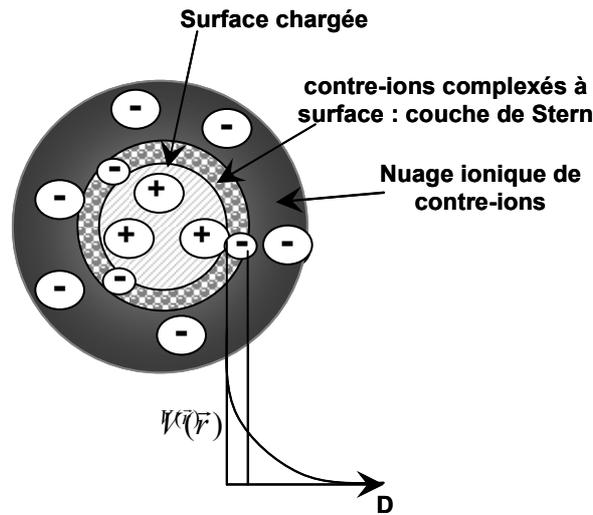


Figure III-2 : Modèle de la double-couche diffuse autour d'une particule chargée en suspension

L'équation de Poisson-Boltzmann est une combinaison de deux équations : celle de Poisson et celle de Boltzmann

$$\Delta V(\vec{r}) + \sum_{i=1}^n \frac{q_i c_i^0}{\epsilon_d} \exp\left(-\frac{q_i V(\vec{r})}{k_B T}\right) = 0 \quad \text{Eq III-2}$$

$V(\vec{r})$: le potentiel électrique

$\rho_e(\vec{r})$: densité de charge

ϵ_d et la permittivité diélectrique La permittivité diélectrique, est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué

$\epsilon_d = \epsilon_0 \epsilon_r$: la permittivité diélectrique du solvant (ϵ_0 étant la permittivité diélectrique du vide, et ϵ_r la permittivité relative du solvant : dans l'eau à température ambiante $\epsilon_r \approx 80$).

q_i : la charge de l'ion

$c_i(\vec{r})$: la concentration en ions de charge q_i

c_i^0 : la concentration en ions de charge q_i loin de la surface chargée, là où le champ électrique est nul

T : la température exprimée en Kelvin

k_B : la constante de Boltzmann qui relie température et énergie thermique.

III.2. Théorie DLVO et concentration critique de coagulation

Pour qu'il y ait une agrégation entre particules il faut que deux conditions soient réunies :

- que les particules entrent en collision ;
- suivant les conditions (hydrodynamiques, physico-chimiques) du milieu, il faut qu'elles puissent rester collées.

La première condition nécessite que les particules soient mises en mouvement les unes par rapport aux autres. Pour que la deuxième condition soit remplie, il faut qu'à l'occasion d'un choc, il existe une certaine attraction entre les particules.

Lorsque deux particules se rapprochent, il existe un potentiel d'interaction total entre les deux surfaces. L'allure de ce potentiel d'interaction dépend de la nature des particules et des conditions physico-chimiques du solvant. Toutefois, on peut toujours distinguer deux cas : interactions attractives ou interaction répulsives.

III.2.1. La théorie DLVO

Le modèle DLVO (d'après les noms de ses auteurs Derjaguin, Landau, Verwey et Overbeek) suppose que l'énergie potentielle d'interaction entre deux surfaces chargées est donnée par la somme de deux contributions : une interaction attractive due aux forces de van der Waals–London et une interaction répulsive due aux charges électrostatiques de même signe (Figure III-3). La dispersion colloïdale sera stable si l'interaction répulsive domine l'interaction attractive. Cette interaction électrostatique diminue par écrantage du champ électrique si la concentration en électrolyte dans la suspension augmente. Lorsque la force ionique (i.e. pression osmotique) du solvant est faible, la couche diffuse des particules est très épaisse, et les répulsions d'origine électrostatique sont importantes. Cette répulsion est forte, dominant le système qui lui confère une stabilité des particules dispersées. Dans le cas contraire, lorsque la force ionique de l'électrolyte est élevée, la couche diffuse se comprime, ce qui réduit la portée des forces de répulsion électrostatique. Dans ce cas les forces de Van der Waals attractives aux courtes distances deviennent prédominantes, et favorisent le collage des particules entrant en collision. Des agrégats se forment, de taille croissante, et sont soumis à la sédimentation gravitaire. La dispersion est déstabilisée. En fonction de la force ionique et de son influence sur la contribution électrostatique répulsive, on distingue les cas suivants (Figure III-3) :

a : les surfaces se repoussent, la dispersion est stable ;

b à **d** : les particules se placent au minimum d'énergie secondaire et commencent à s'agréger ;

e : les particules s'agrègent rapidement.

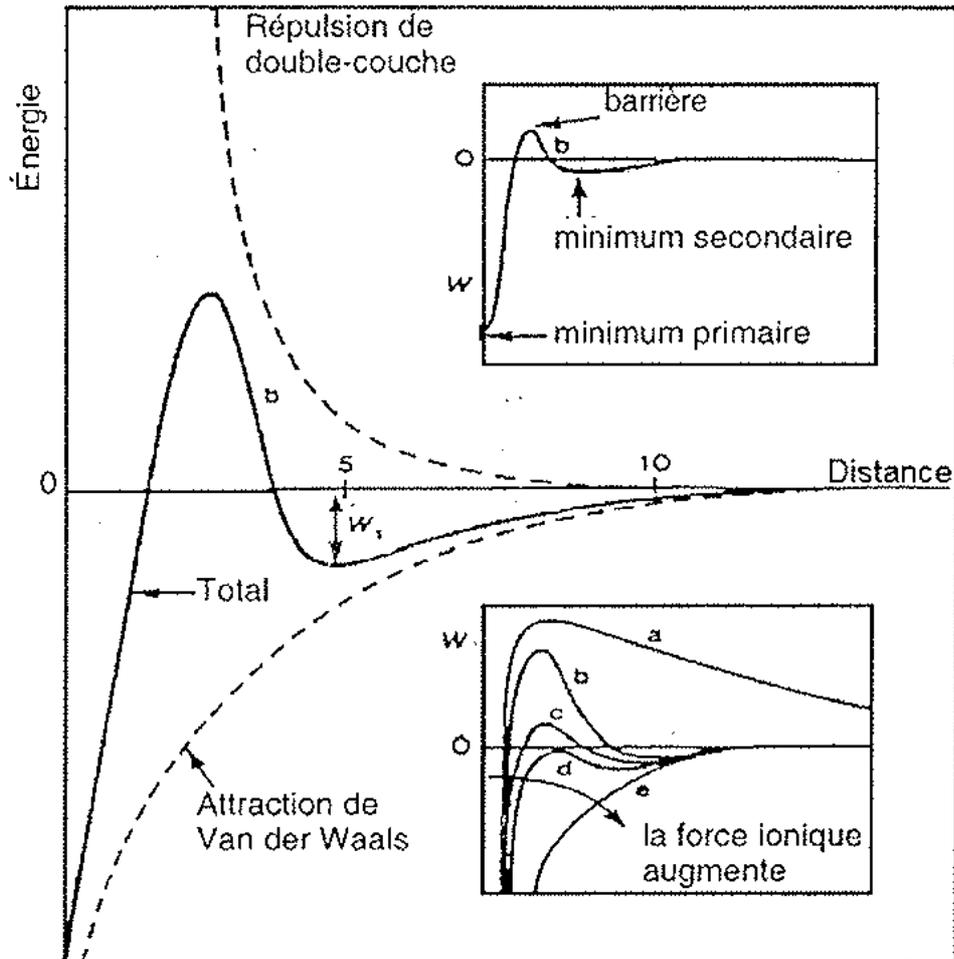


Figure III-3 : Représentation des énergies pour le calcul DLVO

III.2.2. La concentration critique de coagulation (CCC)

La concentration critique de coagulation (CCC) est la concentration de sel qu'il est nécessaire d'ajouter à une suspension colloïdale pour qu'elle soit déstabilisée (Van Olphen, 1977 ; Adachi, 1995 ; Gardner, 1999). Cette déstabilisation est due à l'annulation des forces de répulsions entre les particules colloïdales. La CCC (ρ_{∞}) est d'autant plus basse que la valence du sel (z) est importante, comme l'exprime la règle de Schulze-Hardy (Eq III-3) (Jyh-Ping Hsu et Yung-Chih Kuo, 1995) :

$$\rho_{\infty}(ccc) \propto \frac{1}{z^6} \quad \text{Eq III-3}$$

III.3. Probabilité de chocs efficaces

On définit le terme W , facteur de stabilité, comme le rapport du nombre de chocs total sur le nombre de chocs efficaces entraînant le collage :

$$W = \frac{\text{Chocs totaux}}{\text{Chocs efficaces}} \quad \text{Eq III-4}$$

L'inverse de ce facteur de stabilité est l'efficacité de collision α entre les particules colloïdales

$$\alpha = \frac{1}{W} \quad \text{Eq III-5}$$

Lorsque α est non nul, une certaine proportion de collisions conduit à un collage des particules.

Le calcul de W dépend de la comparaison du profil d'énergie d'interaction avec l'énergie cinétique des particules. Par exemple, des particules de plusieurs μm peuvent être extrêmement stables au repos et s'agréger rapidement si on les agite fortement. Lorsque le mécanisme de collision dominant est lié à l'agitation, il faut considérer le mouvement relatif des particules les unes par rapport aux autres. Les incertitudes liées à la fois à l'estimation de l'importance de la barrière d'énergie et à la détermination des énergies cinétiques des particules en solution font qu'en général, le paramètre α est un paramètre d'ajustement dans les modèles cinétiques.

III.4. Les fréquences de collisions : cas pour le modèle rectilinéaire.

On distingue trois mécanismes de transport prépondérant susceptibles d'entraîner le mouvement relatif des particules colloïdales les unes par rapport aux autres, selon le type d'agitation du milieu.

Nous développons, ici, les expressions des fréquences de collisions (β) dans le cas rectilinéaire où l'on suppose que les particules ne modifient pas mutuellement leur trajectoire lorsqu'elles se rapprochent jusqu'au choc. Par conséquent, la trajectoire est supposée rectiligne. Il existe aussi le cas curvilinéaire où les interactions hydrodynamiques des particules influent sur leur trajectoire. Dans ce cas, la trajectoire est incurvée.

III.4.1. Le mouvement Brownien

Dans tous les cas, les particules colloïdales en suspension sont soumises au mouvement Brownien. Il est lié à l'agitation thermique aléatoire des molécules d'eau du milieu dispersant (Figure III-4). Ce phénomène est constant et indépendant de l'agitation mécanique du solvant. Il varie en fonction de la température et viscosité de celui-ci.

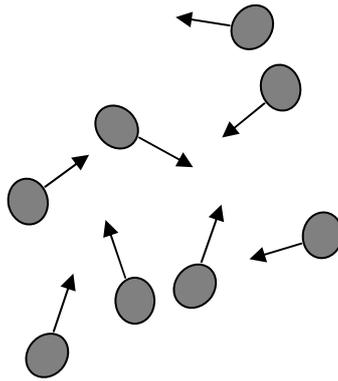


Figure III-4 : Collision par effet Brownien

III.4.2. Agitation mécanique du solvant

Lorsque le solvant est agité mécaniquement, il entraîne de par sa viscosité, les particules qu'il contient. Ainsi, les particules sont animées d'un mouvement qui peut entraîner leurs collisions (Figure III-5). On introduit G (s^{-1}), le gradient de dissipation du milieu, caractéristique du cisaillement apporté.

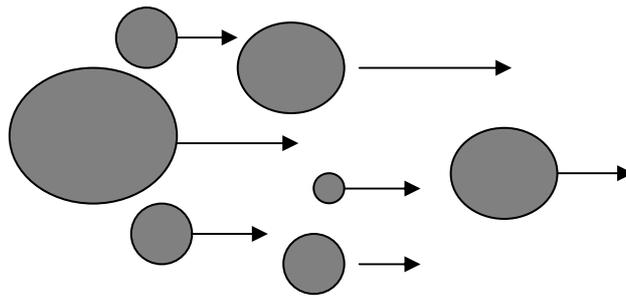


Figure III-5 : Collision par effet de l'agitation mécanique (G)

III.4.3. Sédimentation différentielle

D'après la loi de Stokes, la vitesse de décantation des agrégats, varie en fonction de leur taille et densité. Ainsi, les agrégats formés ne vont pas tous sédimenter à la même vitesse. Les agrégats les plus lourds vont entraîner, au cours de leur chute, les particules ou agrégats qui décantent moins vite (Figure III-6).

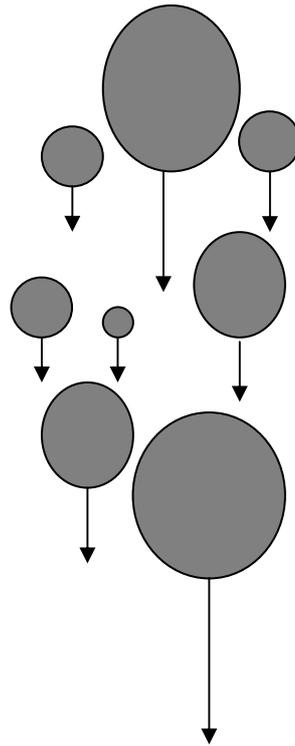


Figure III-6 : collision par effet de la sédimentation

Les fréquences de collision dues au mouvement Brownien (β_{br}), à l'agitation mécanique (β_{sh}) et à la sédimentation différentielle (β_{se}) peuvent être estimées par modélisation :

$$\beta_{br}(i, j) = \frac{2kT}{3\mu} \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \right) (r_i + r_j) \quad \text{Eq III-6}$$

$$\beta_{sh}(i, j) = \frac{4}{3} (r_i + r_j)^3 G \quad \text{Eq III-7}$$

$$\beta_{se}(i, j) = \pi (r_i + r_j)^2 |u_i - u_j| \quad \text{Eq III-8}$$

Avec :

k : constante de Boltzmann

r_i, r_j : rayon des agrégats i et j

u_i, u_j : vitesse de sédimentation des agrégats i et j

T : température

μ : viscosité cinématique du fluide

G : gradient de vitesse

On considère que la fréquence de choc des différentes contributions est additive :

$$\beta_{tot}(i, j) = \beta_{br}(i, j) + \beta_{sh}(i, j) + \beta_{se}(i, j) \quad \text{Eq III-9}$$

Selon les gammes de tailles et les différents paramètres concernant les particules, ce ne sont pas toujours les mêmes mécanismes de collision qui dominent. Dans le cas des particules inférieures à 1µm, les collisions dues au mouvement Brownien dominant souvent. Pour les tailles supérieures, les collisions dues à l'agitation mécanique lorsqu'elles existent, sont souvent prépondérantes.

Pour le cas du modèle curvilinéaire, on utilise les fréquences de chocs rectilinéaires corrigées d'un terme (α) prenant en compte les interactions hydrodynamiques

$$\beta_{tot}^c(i, j) = \beta_{br}^c(i, j) + \beta_{sh}^c(i, j) + \beta_{se}^c(i, j) = \alpha_{br}^c \beta_{br}(i, j) + \alpha_{sh}^c \beta_{sh}(i, j) + \alpha_{se}^c \beta_{se}(i, j)$$

Eq III-10

III.5. Bilan de population

Après l'introduction des réactions à l'interface qui contrôlent la stabilité colloïdale des particules en suspension, dans la suite du chapitre III, nous nous intéresserons plus particulièrement à la cinétique de croissance des agrégats en fonction des conditions physico-chimiques et hydrodynamiques du milieu.

L'expression de Smoluchowski (1917), qui relie le taux de collision entre deux particules au mouvement du fluide, a été établie pour un régime laminaire et met en évidence le cisaillement laminaire.

III.5.1. Agrégation irréversible

Une agrégation est dite irréversible lorsque la liaison qui entraîne le collage de deux particules s'entrechoquant est tellement forte que l'agrégat formé ne peut se désagréger. La

Figure III-7 montre la formation d'agrégats de masse k sous l'effet des chocs efficaces entre deux agrégats ou particules i et j plus petits que k . Lorsque l'agrégation est irréversible, l'unique voie de disparition d'agrégats de masse k est leur collage avec d'autres objets de masse quelconque pour former des agrégats plus gros. La variation de la concentration d'agrégats de masse k est de la forme :

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \alpha(i, j) \sum_{i+j=k} \beta(i, j) n_i n_j - \alpha(i, k) n_k \sum_i \beta(i, k) n_i \quad \text{Eq III-11}$$

$\beta(i, j)$ ($m^3.s^{-1}$) est la fréquence de chocs entre particules de masse i et de masse j ,

$\alpha(i, j)$ correspond à la probabilité de chocs efficaces entre les particules de taille i et de taille j .

Ainsi $\alpha(i, j)\beta(i, j)n_i n_j$ donne le nombre de collisions efficaces par unité de volume et par unité de temps. Le premier terme de l'équation (Eq III-11) correspond à la fabrication d'agrégats de masse k . Le second terme traduit la fabrication d'agrégats plus gros et donc contribue à ce que n_k diminue. Cette équation qui reflète un grossissement continu des agrégats n'est en fait réaliste que dans un domaine fini de taille compatible avec les conditions du milieu. Par exemple l'effet du cisaillement, impose une taille maximale liée à la cohésion des agrégats. C'est pourquoi on peut introduire dans l'équation III-10 un terme de fractionnement des agrégats équivalent à une réversibilité de leur croissance.

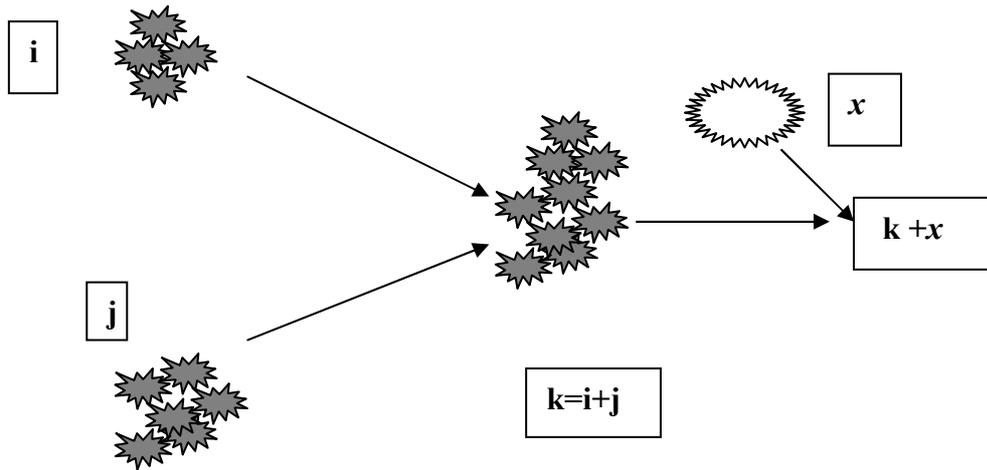


Figure III-7 : Processus d'évolution des agrégats

III.5.2. Agrégation réversible

Dans ce cas, on considère que la réaction d'agrégation a deux sens : le premier est la formation des agrégats, et l'autre, leur désagrégement.

III.5.2.1 Fréquence de rupture

Lorsqu'on prend en compte la rupture des liaisons entre les agrégats, le bilan de masse, ainsi que l'équation Eq III-11 changent. La Figure III-8 nous montre comment un agrégat de masse k peut aboutir de l'agrégation de deux particules plus petites de masse i et j ($i+j=k$) ou bien de la rupture d'un agrégat plus gros de masse $k+x$. Ces processus sont traduits par l'équation III-12.

$$\frac{dn_k}{dt} = \left(\sum_{i+j=k} \frac{1}{2} \alpha(i, j) \beta(i, j) n_i n_j - F(i, j) n_{i+j} \right) - \left(\sum_i \alpha(i, k) \beta(i, k) n_i n_k - F(i, k) n_{i+k} \right) \text{ Eq III-12}$$

Comme dans le cas précédent, α et β sont respectivement les probabilités de chocs efficaces et les fréquences de chocs entre des particules. Les termes $F(i, j)$ traduisent la fréquence de rupture d'agrégats de taille k en agrégats de taille i et j et $F(i, k)$ la fréquence de rupture d'agrégats de taille $k+i$ en agrégats de taille k . Cette approche modèle est plus réaliste dans le sens où, selon les valeurs relatives des termes β et F , le processus d'agrégation conduit à une taille finale d'agrégats en équilibre avec les contributions de croissance et de rupture en présence. Les conditions pour lesquelles cette stabilité est atteinte ont été étudiées par Elminyaw et al.(1991) ; Vigil et al.(1989) ; parmi d'autre. Ces études ont permis d'établir les conditions de stabilité pour différentes formes simples de fréquences de collision et de rupture.

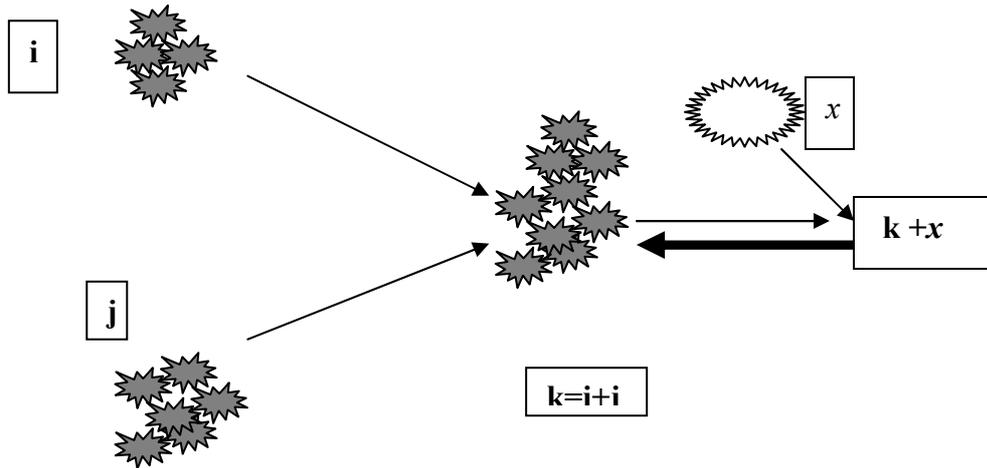


Figure III-8 : Evolution de la concentration de particules de masse k

III.5.2.2 Taille maximale de croissance

La détermination de la taille maximale que les agrégats peuvent atteindre n'est pas facile. Il est possible d'utiliser des expressions du type de celle proposée par Torre et al.(1991) qui propose pour une agitation laminaire une expression qui décrit les tailles maximales des couples de particules susceptibles de conduire à une liaison. Il est possible, également, d'estimer la taille maximale à partir de la micro échelle de Kolmogorov. Plus généralement, cette taille maximale est mesurée expérimentalement après équilibre du processus.

III.5.2.3 Prise en compte de la sédimentation

Il est possible que les agrégats formés finissent par atteindre des tailles pour lesquelles leur vitesse de décantation n'est plus négligeable devant leur vitesse d'agrégation. Lorsque cela se produit, l'évolution de la concentration des particules est aussi contrôlée par leur taux de sédimentation. La vitesse V_s de sédimentation contrôle, au même titre que les fréquences de chocs, l'évolution des populations de tailles de particules. Si l'on ne considère pas les fréquences de ruptures mais une taille maximale, on peut prendre en compte la sédimentation de la façon suivante :

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \alpha(i, j) \sum_{i+j=k}^{k < n_{max}} \beta(i, j) n_i n_j - \alpha(i, k) n_k \sum_i^{i+k < n_{max}} \beta(i, k) n_i - \frac{V_k}{z} n_k \quad \text{Eq III-13}$$

Où V_k est la vitesse de décantation d'une particule de taille k . Lorsque l'on écrit l'équation de cette façon, on suit l'évolution de la concentration dans une couche de hauteur z . Dans cette couche, les concentrations sont considérées homogénéisées.

III.5.3. Initialisation d'un modèle cinétique

III.5.3.1 Principe de discrétisation

Dans l'initialisation du modèle, plusieurs tâches distinctes sont effectuées. La première consiste à découper les masses de particules en suspension (ou les volumes solides) en un nombre fini de classes. Plusieurs choix sont possibles pour effectuer ce découpage.

- **Discrétisation linéaire**

Dans l'équation de Smoluchowsky la plus simple qui correspond à une agrégation irréversible (équation III-10) on a :

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \alpha(i, j) \sum_{i+j=k} \beta(i, j) n_i n_j - \alpha(i, k) n_k \sum_i \beta(i, k) n_i$$

Soit :

$$\frac{dn_1}{dt} = -\alpha(1,1)\beta(1,1)n_1^2 - \alpha(1,2)\beta(1,2)n_1n_2 - \dots - \alpha(1,\infty)\beta(1,\infty)n_1n_\infty$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \alpha(1,1)\beta(1,1)n_1^2 - \alpha(2,1)\beta(2,1)n_2n_1 - \dots - \alpha(2,\infty)\beta(2,\infty)n_2n_\infty$$

... suivant k.

Imaginons que l'on cherche à simuler l'agrégation de particules de $5 \mu\text{m}$ (d_0) jusqu'à une taille maximale d_{max} de $50\mu\text{m}$ avec une dimension fractale de deux. Dans ce cas, le nombre de particules élémentaires par agrégat (n_{max}) suit la loi de puissance

$$n_{max} = \left(\frac{d_{max}}{d_0} \right)^{d_f} = \left(\frac{50}{5} \right)^2 = 100.$$

Dans ce cas, il convient de découper l'espace linéairement en 100 classes de taille intermédiaires entre d_0 et d_{max} . Ce type de discrétisation est simple à réaliser et facilite la résolution des équations différentielles. En effet, tout choc entre deux particules de taille i et j donne une particule de taille $k=i+j$ qui rentre dans une nouvelle classe de particule, comme l'illustre la figure (1)

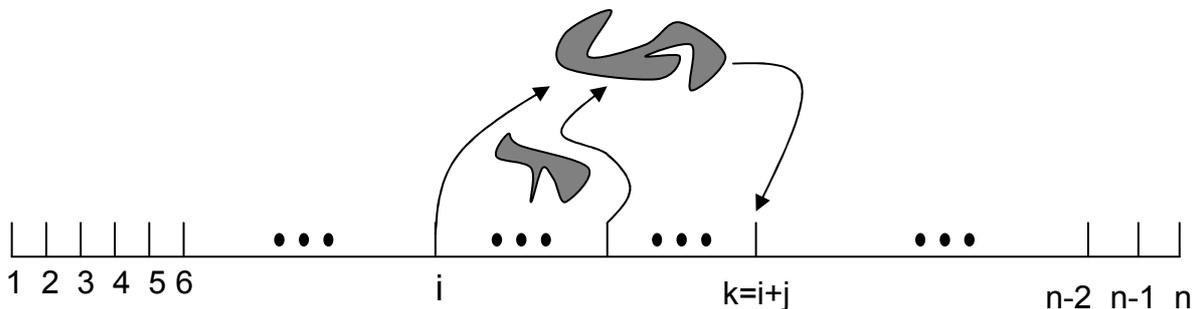


Figure III-9: Discrétisation linéaire en classe de taille

Cette méthode de discrétisation pose deux problèmes importants :

- le nombre d'équations différentielles à résoudre est très grand, et fera augmenter considérablement le temps de calcul

- ce type de discrétisation entraîne un fort comportement multi-échelle des équations différentielles. Autrement dit, les amplitudes d'évolution des différentes classes de tailles, pour un pas de temps donné, sont très variables. En effet, les classes de particules qui correspondent aux agrégats les plus petits vont fortement diminuer mais cela ne conduit qu'à la formation de quelques grandes particules. Il résulte d'un tel comportement que les algorithmes simples de résolution des équations différentielles sont très lents.

Finalement, malgré leur simplicité, les discrétisations linéaires sont quasiment inutilisables, car trop longues à calculer, et trop loin de la réalité.

• Discrétisation à progression géométrique

Les deux problèmes posés par la discrétisation linéaire sont résolus si l'on utilise une discrétisation à progression géométrique des classes de taille.

Le fichier d'entrée comporte les paramètres :

- d_{min} : le plus petit diamètre à considérer,
- d_{max} : le plus grand diamètre possible pour un agrégat
- df : la dimension fractale des agrégats,
- $NBCLASSE$: nombre de classes de taille à définir.

On va découper l'espace des tailles en $NBCLASSE$ classes de taille ou de volume solide $V[i]$ avec $i \in [1, NBCLASSE]$. On écrit le volume de chaque classe de volume ($V[i]$) de la façon suivante :

$$V[i] = 10^{lv[i]} \quad \text{Eq III-14}$$

Les bornes des classes de volume solide sont connues à partir des paramètres du fichier d'entrée. On a :

$$V[1] = \frac{\pi}{6} ap^3 \left(\frac{d_{min}}{ap} \right)^{df} \quad \text{et} \quad \text{Eq III-15}$$

$$V[NBCLASSE] = \frac{\pi}{6} ap^3 \left(\frac{d_{max}}{ap} \right)^{df}$$

D'après l'équation (1) il est possible de calculer les valeurs de $lv[i]$ pour $i = 1$ et $i = NBCLASSE$. On a

$$lv[1] = \frac{\log(V[1])}{\log(10)} \quad \text{et} \quad \text{Eq III-16}$$

$$lv[NBCLASSE] = \frac{\log(V[NBCLASSE])}{\log(10)}$$

La progression géométrique des volumes solides se fait avec le pas $lvstep$ défini par :

$$lvstep = \frac{lv[NBCLASSE] - lv[1]}{NBCLASSE - 1} \quad \text{Eq III-17}$$

Et les classes de volume solide sont donc calculées selon la progression géométrique suivante :

$$V[i] = 10^{lv[1] + i * lvstep} \quad \text{où } i \in [0, NBCLASSE - 1] \quad \text{Eq III-18}$$

En procédant ainsi, il est possible de contrôler le nombre d'équations différentielles à résoudre quels que soient les paramètres $dmin$, $dmax$, ap et df fournis dans le fichier d'entrée. Le problème des temps de calcul (trop longs) posé par la discrétisation linéaire est ainsi résolu. Toutefois, le nombre réduit d'équations complique la gestion des chocs. En effet, si dans le cas d'une discrétisation linéaire tout choc conduit à la formation d'un amas, pour lequel il existe une classe de particule adaptée, ce n'est pas le cas d'une discrétisation géométrique. La figure 2 montre un choc pour lequel on a $m[k] \leq m[i] + m[j] \leq m[k+1]$.

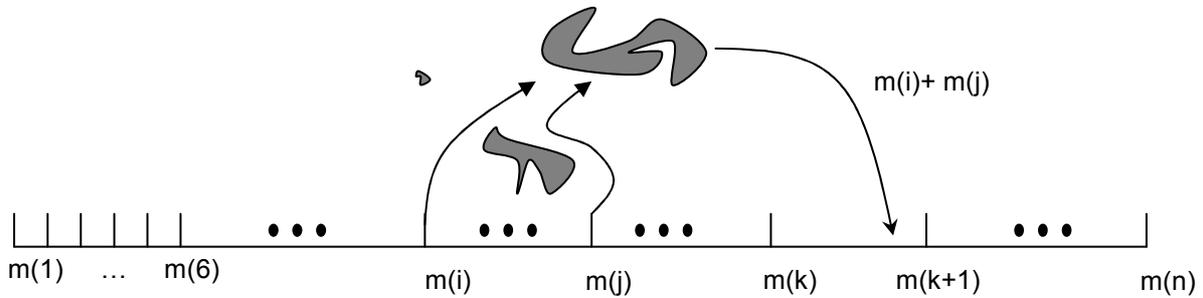


Figure III-10: Discretisation géométrique en classe de taille

Il n'est pas possible d'attribuer ce choc à l'une des deux classes de volume adjacentes. En effet, en attribuant le choc à la classe de taille $m[k]$, on ralentit artificiellement la cinétique de croissance. Inversement si on attribue le choc à la classe de taille $m[k+1]$ la cinétique est accélérée. Pour résoudre ce problème, les agrégats issus du choc sont répartis entre les classes de taille adjacentes selon des quantités pondérées par le barycentre des tailles. On calcule le facteur *fract* défini comme :

$$fract(i, j) = 1 - \frac{(V[i] + V[j]) - V[k]}{V[k+1] - V[k]} \quad \text{où } V = \frac{m}{\rho} \quad \text{Eq III-19}$$

Ainsi selon la position du choc relativement aux classes de taille adjacentes, la taille (ou le volume solide) sera réparti différemment

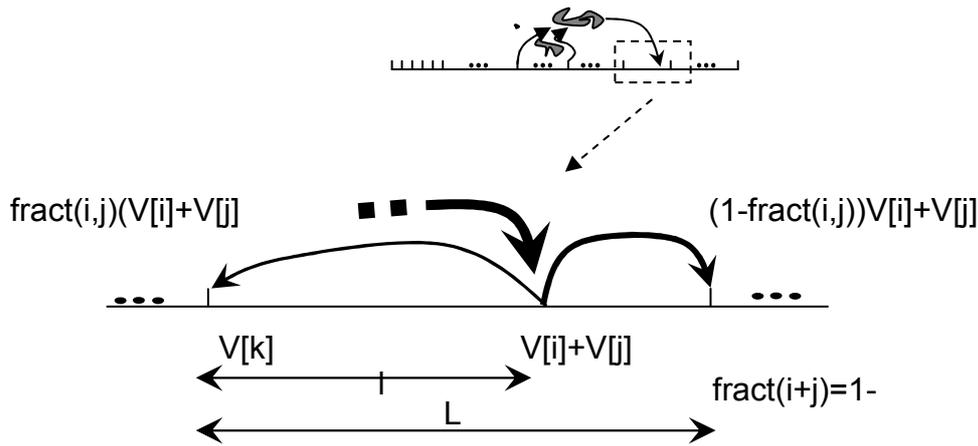


Figure III-11: Gestion des chocs dans le cas d'une discrétisation géométrique

Le deuxième problème lié à la discrétisation linéaire est la trop grande différence des amplitudes d'évolution des classes de particules correspondant aux petits volumes par rapport aux classes de volume plus grand. Avec la discrétisation géométrique cette différence d'amplitude est réduite, car pour les petits volumes, il y a un plus grand nombre de classes de particules dans une même fourchette de volume. Inversement, pour les grands volumes, il y a un grand nombre de classes de tailles linéaire pour peu de classes de volume géométrique.

III.6. Modélisation de l'agrégation et estimation de la taille des particules argileuses

Pour d'écrire l'évolution des populations des argiles testées, (chapitre IV) on a utilisé le modèle cinétique développé par A. Thill (1999) incluant :

- Discrétisation géométrique des classes de taille,
- Prise en compte de la géométrie fractale dans le calcul des fréquences de choc
- Calcul des fréquences de choc selon plusieurs modes d'approche (rectilinéaire, curvilinéaire ou intermédiaire)
- Prise en compte de la fragmentation des agrégats.

Pour le calcul des fréquences de chocs, Thill utilise le modèle de fréquence de choc intermédiaire (combinaison des deux modes de déplacements) proposé par Veerapaneni et Wiesner (1996). Ce modèle intermédiaire fait la somme entre les deux modèles curvilinéaire et rectilinéaire, moyennant le facteur η qui les contrôlera. On considère qu'une valeur de $\eta = 1$ correspond au mode d'approche rectilinéaire et qu'une valeur $\eta = 0$ traduit un mode de déplacement curvilinéaire. Ainsi, on obtient les fréquences de chocs pour l'approche intermédiaire $\beta_{\text{intermédiaire}}(i, j)$, en utilisant :

$$\beta_{\text{intermédiaire}}(i, j) = \eta \beta_{\text{rectilinéaire}}(i, j) + (1 - \eta) \beta_{\text{curvilinéaire}}(i, j)$$

Le modèle intermédiaire est seulement valable pour les hypothèses suivantes :

- Les particules primaires sont homogènes. Il n'y a pas de mélange de différents types de particules aux propriétés variables mais un seul type de particule « moyenne » de densité constante.
- Les fréquences de chocs des différents mécanismes (Brownien, agitation et décantation différentielle) sont considérées additives.
- On ne considère que les collisions binaires (impliquant 2 particules).

- La probabilité de collage est indépendante de la taille des particules ; ainsi $\alpha(i, j) = \alpha \forall i, j$
- A (constante de Hamaker) est fixé comme paramètre d'entrée.
- Le modèle simule une seule entité de fluide homogène.

Ce modèle va nous servir à estimer la taille des particules pour les cisaillements atteints dans le labyrinthe. Afin d'initialiser ce modèle, nous avons réalisés des expériences de mesure d'agrégation dans un réacteur de type Taylor-Couette qui permet de contrôler les valeurs du taux de cisaillement. Ainsi, nous caractériserons la cinétique d'agglomération pour différents cisaillement et différentes concentrations en sel, de sorte à extrapoler ces résultats pour estimer la taille moyenne des argiles dans les systèmes d'irrigation testés.

Chapitre IV

Influence des caractéristiques physico-chimiques d'une eau chargée en argile sur les processus de colmatage

Dans ce chapitre on travaillera avec une suspension de deux types d'argile sous conditions contrôlées de cisaillement et de salinité de la solution. Ce travail se divise en deux parties, la première sur la caractérisation des argiles et la seconde sur l'étude de l'impact de l'argile combiné à la présence (ou non) du sel NaCl sur l'évolution du débit en sortie des goutteurs.

IV.1. Stabilité colloïdale des argiles vis-à-vis du cisaillement et de la force ionique

Deux types d'argile ont été retenus pour cette étude : un mélange argilo-calcaire à base d'illite pour son abondance dans les eaux superficielles qui alimentent les systèmes d'irrigation, et une bentonite pour sa réactivité et sensibilité aux conditions physico-chimiques (telles que la concentration en sel) et aux conditions hydrodynamiques, lors de la mise en service de ces systèmes d'irrigation

IV.1.1. Minéralogie des argiles par diffraction des rayons X

Cette mesure permet de déterminer les éléments constitutifs d'un matériau. Le protocole et le principe sont détaillés dans le paragraphe (II.1.6)

- **Le mélange argilo-calcaire**

C'est un mélange qui se présente sous la forme d'une poudre grisâtre. L'analyse minéralogique, donnée par le diagramme (Figure IV-1), nous indique que ce mélange est issu d'un gisement argileux à base d'illite et de kaolinite, et où la proportion de calcite est également très importante.

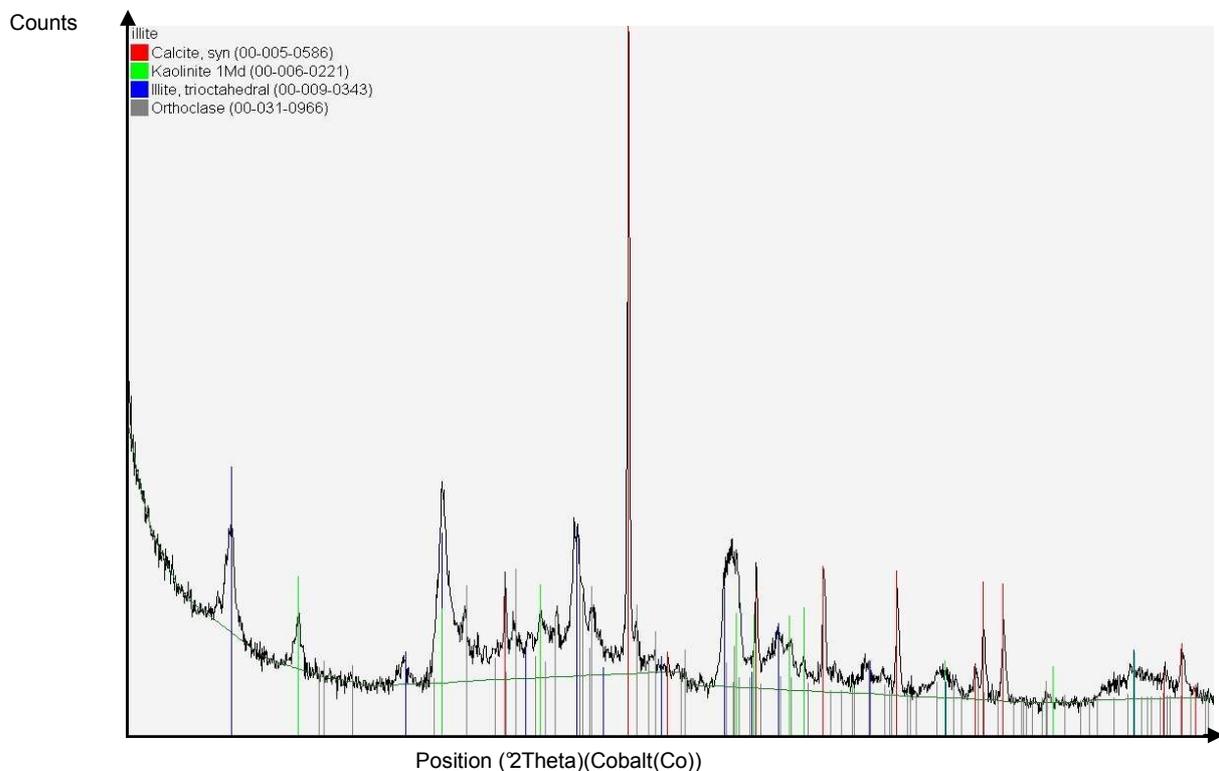


Figure IV-1 : Minéralogie du mélange argilo-calcaire

- **La bentonite**

C'est une argile « plastique » dont le nom vient de Fort Benton aux Etats-Unis. Connue parfois sous le terme générique de *terre de foulon* (qui regroupe aussi d'autres argiles absorbantes), elle est essentiellement constituée de Montmorillonite. Les gisements de Bentonite sont d'origine volcanique ou hydrothermale.

Il existe deux types de bentonite :

- La Bentonite Calcique ou non gonflante qui est la plus abondante dans le monde.
- La Bentonite Sodique dite gonflante qui présente des propriétés de gonflement et de gélification.

L'ABSOCLAY® NAW est une Montmorillonite Sodique Naturelle extraite au Wyoming (USA) et traitée à l'usine de CMMP de Saint-Quentin (02).

L'analyse minéralogique de cette bentonite par diffraction X confirme l'abondance de montmorillonite sodique (Figure IV-2) de formule $(\text{Na}_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$, qui lui confère des propriétés remarquables de gonflement en présence d'eau dans l'espace interfoliaire.

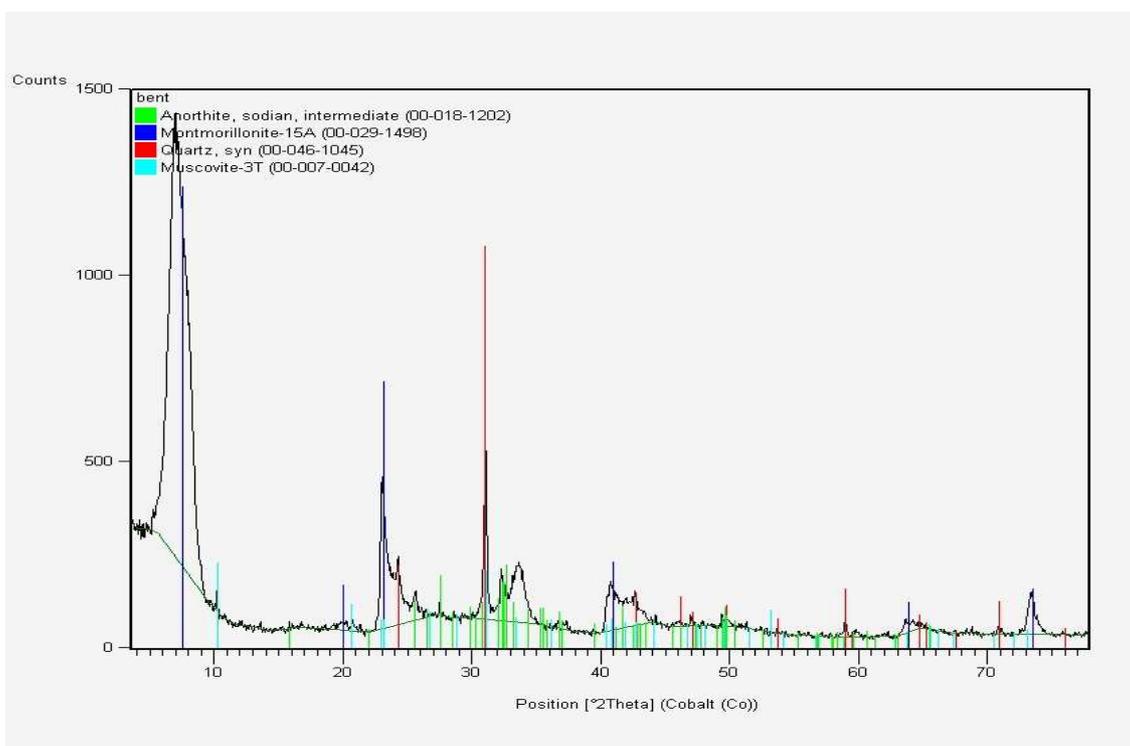


Figure IV-2 : Minéralogie de la bentonite

IV.1.2. Potentiel électrique de surface mesuré par mobilité électrophorétique

Le potentiel électrocinétique, appelé aussi potentiel ZETA, a été utilisé dans ce cas d'études pour nous donner la valeur de la charge électrique de surface des particules en suspension. Cette mesure du potentiel Zêta, nous permet d'estimer l'intensité des répulsions

électrostatiques inter-particules et par conséquent, le bilan des forces s'exerçant à leur interface, favorisant ou non l'agrégation



Figure IV-3: photo du Zetamètre et de la cellule de mesure

- **Charge de surface des particules**

Les particules, provenant de l'érosion des sols et transportées par l'eau, ont une certaine charge de surface. Cependant l'intensité de leur charge varie en fonction de leur nature, de la salinité de l'eau, et surtout du pH. Les particules minérales sont majoritairement chargées négativement à pH voisin de la neutralité.

La charge électrique de surface induit une concentration de contre ions de la solution à la surface des particules. Ceux-ci sont répartis en une double couche (Figure IV-4) :

- La couche au contact de la surface est appelée **couche de Stern**. Son épaisseur est de l'ordre de l'Angström.
- Une **couche diffuse** ou **nuage de contre-ions s'organise autour de la couche de Stern** afin de compenser totalement la charge intrinsèque de la particule, lorsque la couche de Stern ne suffit pas. Son épaisseur diminue quand la force ionique augmente.

C'est l'épaisseur de la couche diffuse qui définit la distance d'incidence des répulsions électrostatiques entre deux particules identiques. On parle de longueur de Debye. Au delà de cette distance, le potentiel électrique n'a plus d'effet sur les interactions entre les particules.

Le potentiel zêta est une grandeur mesurable expérimentalement qui permet d'estimer la charge électrique de surface d'une particule. Celui-ci est variable selon les conditions du milieu et notamment le pH qui influence directement la charge des particules, mais également en fonction de la présence de divers éléments chimiques sous forme ionique (Na^+ , K^+ , etc.) qui modifient l'équilibre électrique du milieu.

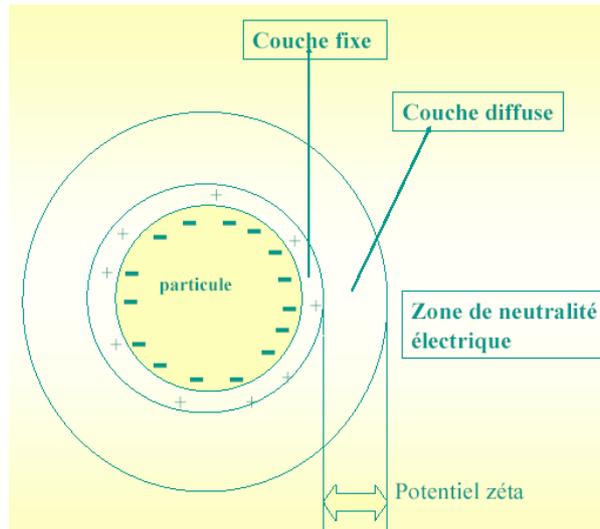


Figure IV-4: Schéma de la double couche diffuse en surface d'une particule chargée immergée dans un électrolyte.

- **Principe de la mesure**

Si une particule est soumise à un champ électrique, celle-ci se déplace à une vitesse caractéristique et proportionnelle à sa charge et à l'intensité du champ. Lors de son déplacement, la particule chargée entraîne avec elle les contre-ions de la couche de Stern, alors que le nuage ionique de la couche diffuse s'étire dans le sens opposé (Figure IV-4). L'interface entre ces deux couches est appelée plan de coupure hydrodynamique. La vitesse de déplacement de la particule sous le champ électrique est appelée mobilité électrophorétique. Elle peut être mesurée expérimentalement par analyse d'image sous microscope ou bien par diffusion de lumière. Le potentiel électrique au plan de coupure hydrodynamique est directement tiré de la mobilité électrophorétique par la loi de Henry. C'est le potentiel Zéta, exprimé en [mV].

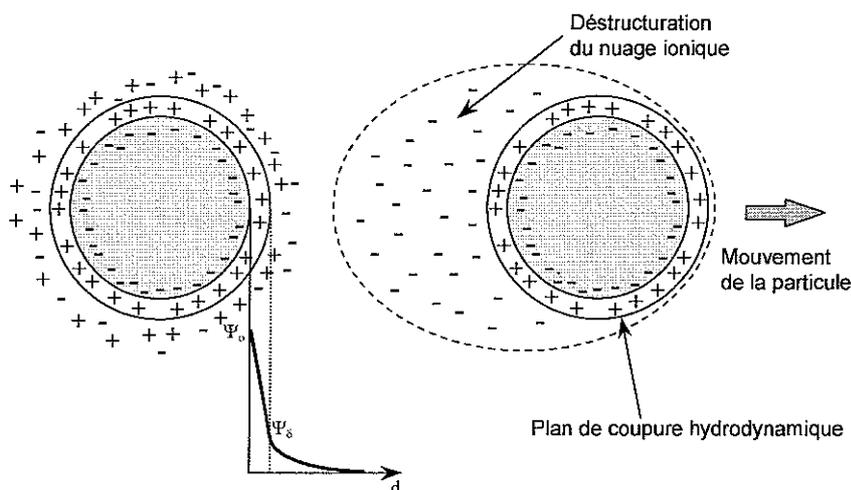


Figure IV-5: Principe de mesure du potentiel zéta

La préparation des échantillons est faite dans des béciers agités par des barreaux magnétiques. Chaque bécier est rempli de 200ml d'eau ultrapure avec 200mg/L d'argile. On

injecte ensuite une concentration de sel, on maintient l'agitation pendant 30min le temps que la solution soit homogène. On prélève après homogénéisation un volume que l'on l'injecte dans la cellule (Figure IV-3) du Zétamètre.

- **Mélange argilo-calcaire**

Le potentiel Zeta a été mesuré pour le mélange argilo-calcaire en présence de NaCl à différentes concentrations.

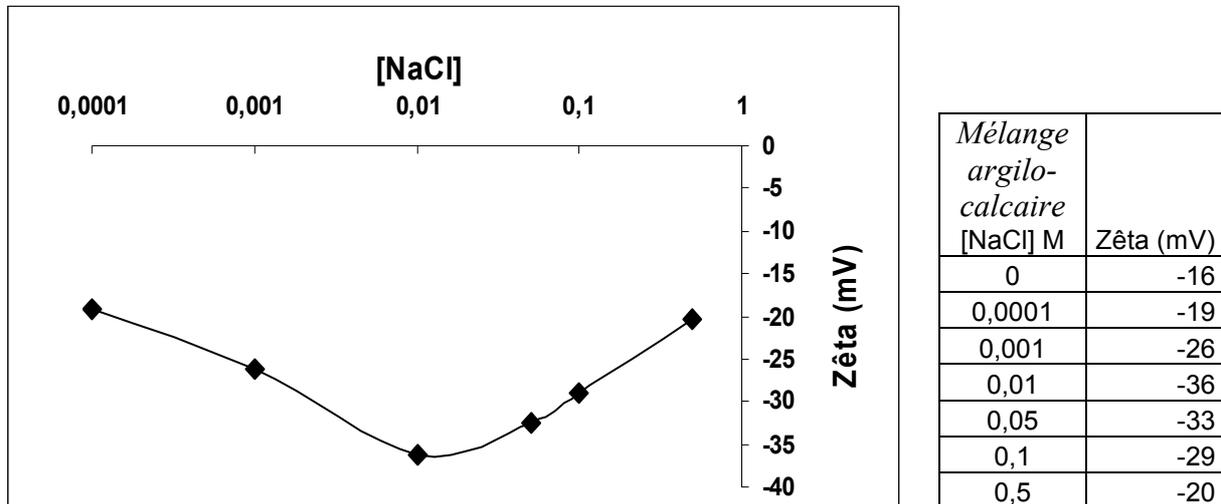


Figure IV-6 : Effet du NaCl sur la charge surfacique du mélange argilo-calcaire

Lorsque la concentration en sel augmente jusque 0,01 M, le potentiel zêta des particules augmente de -20 à -45 mV. Puis pour des concentrations en sel supérieures, il diminue de nouveau jusque -20 mV. Cette évolution non monotone est certainement due à la nature minérale hétérogène de l'échantillon et/ou à son agrégation.

- **La bentonite**

Le protocole est le même que celui suivi pour le mélange argilo-calcaire

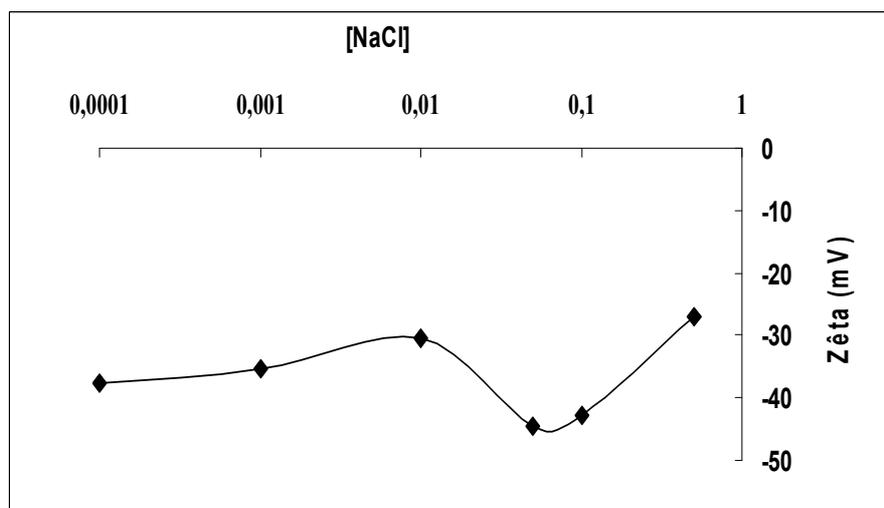


Figure IV-7: Effet de la force ionique sur la charge surfacique de la bentonite

Pour des concentrations en sel inférieures à $5 \cdot 10^{-2}$ M, le potentiel Zêta de la bentonite est de l'ordre de -35 mV (Figure IV-7). A $5 \cdot 10^{-2}$ M, il chute brutalement à -45 mV. Ceci est certainement dû à un début d'agrégation bord/face des feuillets de montmorillonite, qui tend à consommer leur surface latérale chargée négativement. Au delà de cette concentration, lorsque la concentration en sel atteint $5 \cdot 10^{-1}$ M, le potentiel zêta se neutralise vers -25 mV. Ceci est certainement dû à l'agrégation plus poussée des particules qui tend à diminuer leur mobilité.

IV.1.3. Effet couplé de la force ionique et du cisaillement sur agrégation des particules

Etudions la granulométrie des particules en suspension et son évolution en fonction des deux paramètres que sont la force ionique (concentration en NaCl) et le cisaillement. Ces deux paramètres peuvent provoquer l'agglomération des particules en augmentant la probabilité de chocs et l'efficacité de collage. A l'inverse le cisaillement peut aussi provoquer une fragmentation des agrégats lorsqu'ils augmentent de taille. Nous avons donc cherché à caractériser l'impact du cisaillement sur la granulométrie des agrégats en suspension. Pour ce faire, nous avons soumis des échantillons à différentes contraintes de cisaillement dans un réacteur Taylor-Couette.

IV.1.3.1 Principe du réacteur de Taylor-Couette

Un réacteur de type Taylor-Couette est constitué de deux cylindres concentriques avec un cylindre interne entraîné en rotation et un cylindre externe fixe (Figure IV-8). L'espace annulaire défini par les deux cylindres est appelé entrefer (e).

$$e = R_2 - R_1$$

Eq IV-1

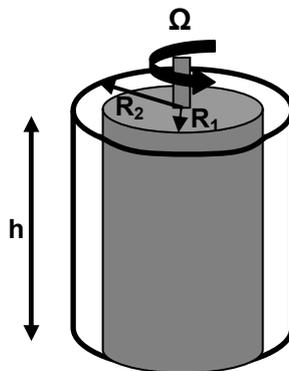


Figure IV-8 : Schéma d'un réacteur de type Taylor-Couette

Les écoulements dans la cellule de Couette ont été largement étudiés par le passé (Coles, 1965, Frenstermacher et al. 1979, Katoaka, 1986, Coughlin et Marcus 1992, Tagg, 1994, Wereley et Lueptow, 1998). Ces travaux ont permis d'identifier différents régimes et d'en étudier les transitions. Ces différents régimes rencontrés dans des réacteurs de Taylor-Couette sont généralement recensés par ordre croissant de vitesse de rotation pour laquelle ils sont observés. Les études avec ce type de réacteur sont limitées aux écoulements créés par le mouvement rotatif du cylindre interne.

Pour caractériser l'écoulement au sein de ce réacteur, on définit un nombre adimensionnel, le nombre de Taylor-Couette. Ce nombre permet de caractériser la transition turbulente de l'écoulement d'un fluide contenu dans l'espace annulaire des deux cylindres. Le nombre de Taylor (Ta) est lié au rapport de la force centrifuge et des forces visqueuses :

$$Ta = \left(\frac{R_1 \Omega (R_2 - R_1)}{\nu} \right)^2 \quad \text{Eq IV-2}$$

Avec

- $R_1 = 0,2\text{m}$. (rayon du cylindre interne)
- $R_2 = 0,115\text{m}$ (rayon du cylindre externe)
- Ω : vitesse de rotation du cylindre interne [s^{-1}]
- ν : viscosité cinématique du fluide [m^2s^{-1}]

Il existe 3 types d'écoulement dans le réacteur Taylor-Couette

1. à $Ta = Ta_c = 1712$ l'écoulement est de type laminaire
2. à $Ta = 1.27 Ta_c$ ($1.712 \times 10^{+3} < Ta < 6.85 \times 10^{+4}$) l'écoulement devient de type Vortex Flow
3. à $Ta = 40 Ta_c$ ($Ta > 6.85 \times 10^{+4}$) l'écoulement est turbulent.

Les équations ci dessous permettent de calculer le nombre de Reynolds (Re), la dissipation (ϵ) et le cisaillement (G) qui sera directement lié à la vitesse de rotation du réacteur Couette

$$Re = \frac{\Omega R_1 (R_2 - R_1)}{\nu} \quad \text{Eq IV-3}$$

$$< \quad \text{Eq IV-4}$$

$$\epsilon = \left(\frac{1.25 * 10^{-3} * R_i^4 \Omega^{-3}}{R_e^2 - R_i^2} \right)$$

$$G = \sqrt{\frac{\epsilon}{\nu}} \quad \text{Eq IV-5}$$

N	$\Omega(\text{rad/s})$	Ta	Re	ϵ	G (s-1)
1	0,10471976	2,47E+04	1,57E+02	4,45E-08	0,211
3	0,31415927	2,22E+05	4,71E+02	1,20E-06	1,096
5	0,52359878	6,17E+05	7,85E+02	5,56E-06	2,359
10	1,04719755	2,47E+06	1,57E+03	4,45E-05	6,672
15	1,57079633	5,55E+06	2,36E+03	1,50E-04	12,257
20	2,0943951	9,87E+06	3,14E+03	3,56E-04	18,870
25	2,61799388	1,54E+07	3,93E+03	6,95E-04	26,372
30	3,14159265	2,22E+07	4,71E+03	1,20E-03	34,667
35	3,66519143	3,02E+07	5,50E+03	1,91E-03	43,685
40	4,1887902	3,95E+07	6,28E+03	2,85E-03	53,373
45	4,71238898	5,00E+07	7,07E+03	4,06E-03	63,687
50	5,23598776	6,17E+07	7,85E+03	5,56E-03	74,591
55	5,75958653	7,46E+07	8,64E+03	7,41E-03	86,055
60	6,28318531	8,88E+07	9,42E+03	9,61E-03	98,053
65	6,80678408	1,04E+08	1,02E+04	1,22E-02	110,561
70	7,33038286	1,21E+08	1,10E+04	1,53E-02	123,561
75	7,85398163	1,39E+08	1,18E+04	1,88E-02	137,033
80	8,37758041	1,58E+08	1,26E+04	2,28E-02	150,962
85	8,90117919	1,78E+08	1,34E+04	2,73E-02	165,334
90	9,42477796	2,00E+08	1,41E+04	3,24E-02	180,134
95	9,94837674	2,23E+08	1,49E+04	3,82E-02	195,352
100	10,4719755	2,47E+08	1,57E+04	4,45E-02	210,976
110	11,5191731	2,99E+08	1,73E+04	5,92E-02	243,401

Tableau IV-1 : Valeurs de cisaillement en fonction de la vitesse de rotation du réacteur Couette-Taylor.

La suspension de 200 mg/l d'argile est préparée dans un volume de 5l. L'agitation est assurée par un agitateur à pales. Après 30 minutes d'agitation on prélève un volume de 2l pour remplir le réacteur Taylor-Couette. Les cisaillements au sein du labyrinthe d'un goutteur de type GR (II.1.2) sont de l'ordre de 1000 s^{-1} (II.1.2.2). Nous ne pouvons pas reproduire un tel cisaillement avec le réacteur Couette. Nous avons donc mesuré la cinétique d'agglomération pour une gamme de cisaillement accessible à différentes concentrations en sel, de sorte à extrapoler ces résultats pour estimer la taille moyenne des agrégats dans les systèmes d'irrigation testés. On lance l'analyse granulométrique à raison de 3s pour chaque mesure. Après 10 mesures on injecte la concentration de sel voulue dans le réacteur.

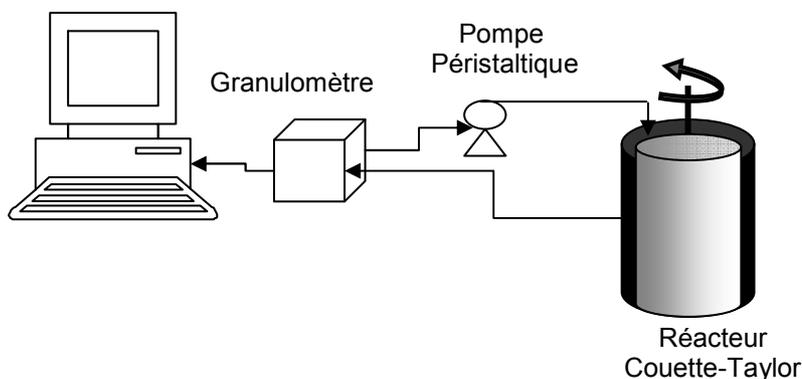


Figure IV-9 : Schéma de principe pour la mesure granulométrique sous cisaillement contrôlé

IV.1.3.2 Mélange argilo-calcaire

La distribution de taille des particules du mélange argilo-calcaire dans l'eau s'étale de 200 nm à 20 μm , avec une valeur médiane D50 située à 4 μm (Figure IV-10)

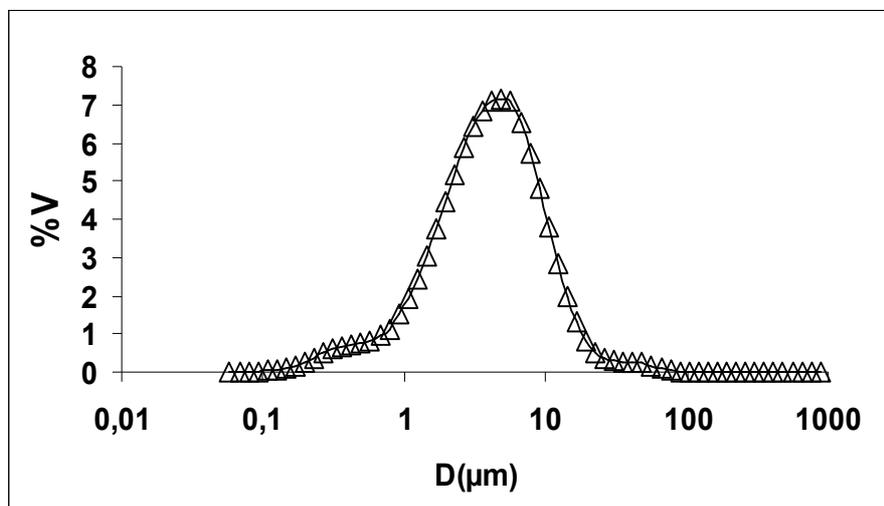


Figure IV-10 : Distribution volumique de la taille des particules du mélange argilo-calcaire sans adjonction de sel.

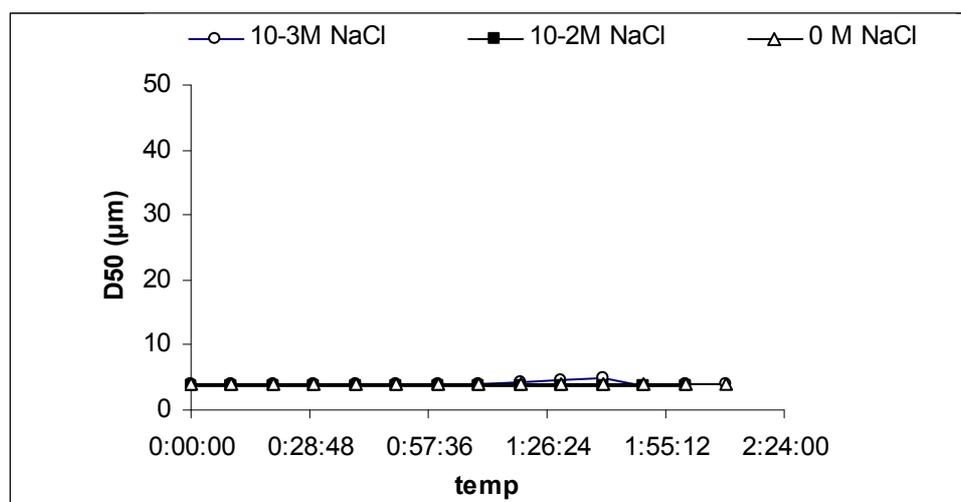


Figure IV-11 : Effet de la force ionique sur la taille des particules du mélange argilo-calcaire

L'ajout de sel NaCl sur cette suspension initiale n'a aucun effet sur l'évolution temporelle de la taille des particules. Celle-ci reste inchangée même après 2heures. La stabilité du mélange argilo-calcaire en suspension révèle donc son insensibilité à la concentration en contre-ions monovalents dans la gamme étudiée.

IV.1.3.3 La bentonite

Les mesures de la suspension de bentonite obtenues en absence de sel sous différents cisaillements $G(\text{s}^{-1})$ (Figure IV-13) montrent que le diamètre médian des particules (D50) est insensible aux variations du cisaillement. Le D50 reste de l'ordre de 5 μm quel que soit le

cisaillement. Cette valeur correspond donc à la taille élémentaire des particules constituant l'argile.

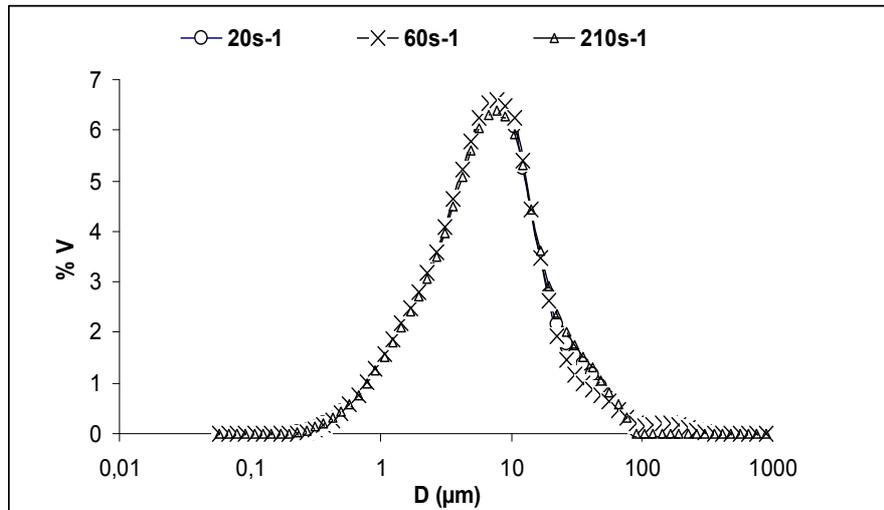


Figure IV-12 : Distribution volumique de la taille des particules de bentonite, en fonction du cisaillement, sans adjonction de sel.

Une fois la taille (D50) des particules de bentonite vérifiée, on s'intéresse à l'influence de la force ionique sur la coagulation des particules argileuses en fonction du cisaillement. En présence de sel NaCl à 10^{-3} M, la distribution de taille reste centrée autour de 5 µm, quelle que soit le cisaillement. La coagulation de l'argile n'a donc pas lieu, en revanche, à 10^{-2} M de NaCl, le D50 augmente (Figure IV-13) de près 300 % de sa valeur initiale lorsque le cisaillement augmente de 20 à 125 s^{-1} . Une concentration critique de coagulation est donc atteinte, et ce lien entre la taille et le cisaillement témoigne d'une cinétique d'agrégation limitée au moins par la fréquence de collision des particules.

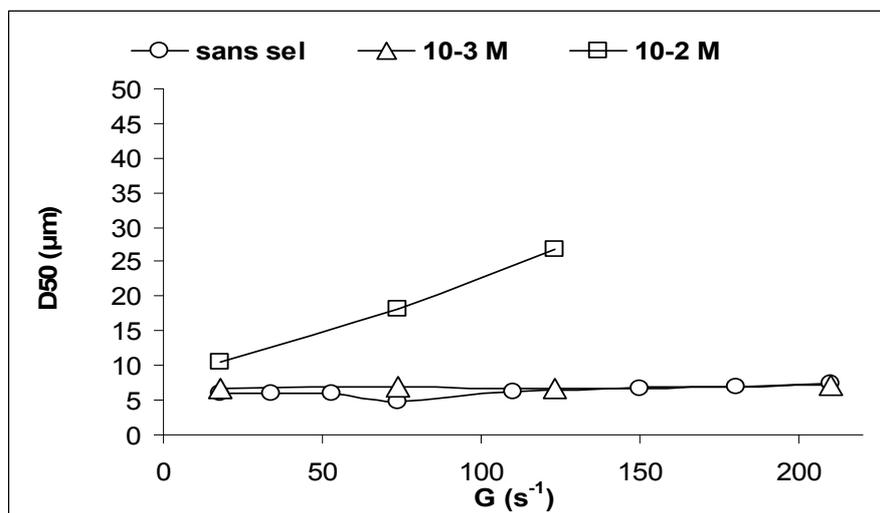
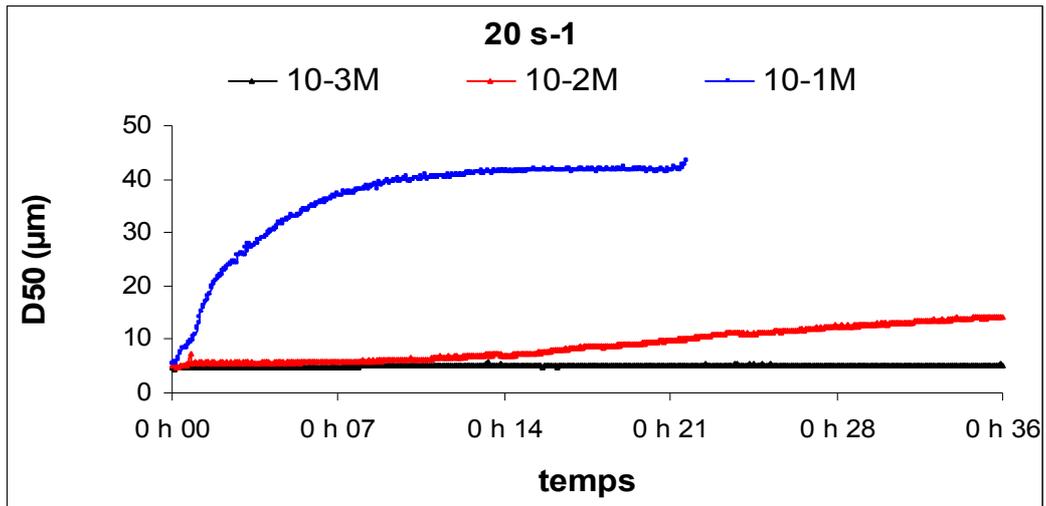


Figure IV-13 : Taille médiane D50 des particules de bentonite en fonction du cisaillement et de la concentration en sel. Chaque mesure est enregistrée après 36 minutes de stabilisation.

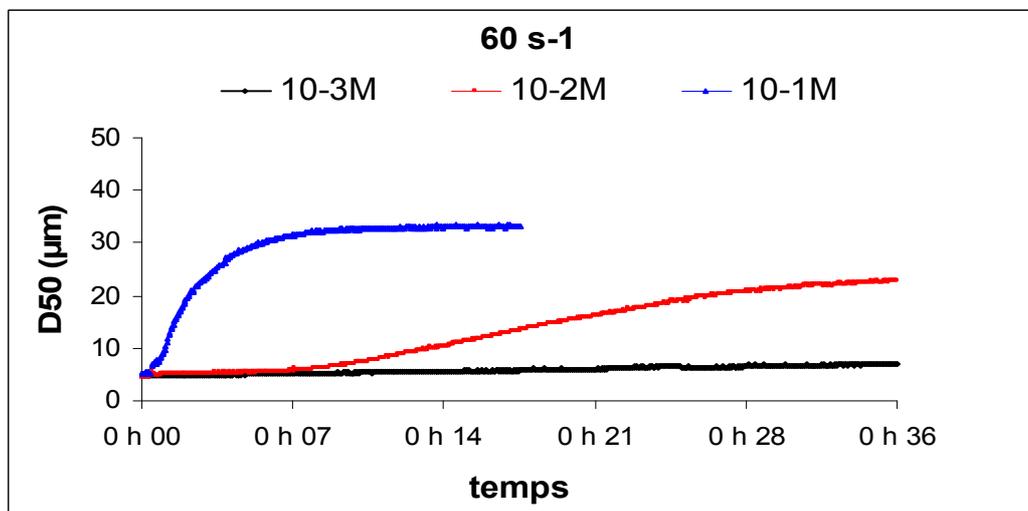
IV.1.4. Effets de la concentration en sel et du cisaillement sur la cinétique d'agrégation de la bentonite

Trois concentrations en sel NaCl (10^{-3} , 10^{-2} , et 10^{-1} M) et trois valeurs de cisaillements (20, 60, 210 s^{-1}) ont été imposées sur la suspension de bentonite, afin d'étudier leurs effets respectifs sur la cinétique d'agrégation par coagulation de celle-ci. Les résultats sont présentés en figures IV-11 avec l'évolution de la taille médiane des agrégats D50 en fonction du temps, mesurée par diffraction laser en sortie directe du réacteur Couette.

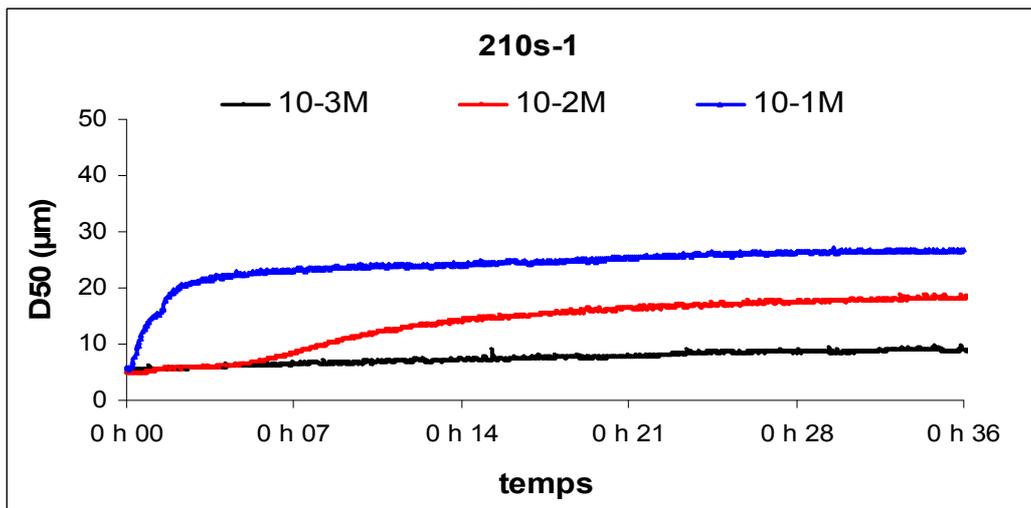
Il se confirme, comme vu en figure IV-10, que quel que soit le cisaillement, la concentration en sel 10^{-3} M est insuffisante pour favoriser l'agrégation de la suspension par coagulation. En revanche, en présence de NaCl à 10^{-2} M, une augmentation de la taille des agrégats est observée, selon une cinétique croissante avec le cisaillement. Ce comportement est typique du régime d'agrégation lente RLA (reaction limited aggregation), où seulement une faible fraction des collisions inter particules entraîne leur collage. Dans ce cas l'agrégation dépend essentiellement de la fréquence de collision. Sous ce régime, la taille des agrégats formés au bout de 30 minutes ne semble pas particulièrement corrélée au cisaillement du système, oscillant entre 10 et 20 microns. En revanche, la taille stabilisée au plateau est atteinte d'autant plus vite que le cisaillement est important. En présence de NaCl à 10^{-1} M, une cinétique d'agrégation rapide est observée, permettant la formation d'agrégats plus gros de 20 à 40 microns, dont la taille diminue quand le cisaillement augmente. Dans ces conditions, le cisaillement n'a plus seulement pour effet de favoriser les collisions inter particules, et donc l'agrégation : il est aussi à l'origine d'une tendance inverse, en compétition avec le mécanisme d'agrégation, le fractionnement des agrégats formés lorsque leur cohésion interne est insuffisante pour supporter leur grande taille. Ce comportement est typique d'un régime d'agrégation DLA (diffusion limited aggregation), avec des cinétiques rapides et corrélées à la fréquence de collision.



(a)



(b)



(c).

Figure IV-14 : Effet de la concentration de sel sur l'évolution temporelle du D50 pour les valeurs de cisaillement de $G=20s^{-1}$ (a), $G=60s^{-1}$ (b) et $G=210s^{-1}$ (c)

Sur la Figure IV-14, on distingue deux effets qui s'articulent entre eux, l'effet de concentration en sel et l'effet du cisaillement.

- L'effet de la concentration en sel : on remarque que plus on augmente la force ionique plus on obtient une cinétique de coagulation bien visible due à la quantité d'ions apportée à la solution qui se fixent sur la surface des argiles. La tendance observée sur les trois figures (a, b, et c) est identique pour chacune des concentrations en sel (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} M). Concernant la plus forte concentration (10^{-1} M) on remarque une augmentation rapide des diamètres des particules jusqu'à un point d'équilibre au-delà duquel la taille des particules ne varie plus. Il est possible de définir à partir de ces graphiques une vitesse d'agrégation en $\mu\text{m/s}$, qui correspond à la pente maximale de la courbe, pour les concentrations de 10^{-1} M et 10^{-2} M. Pour la courbe à 10^{-3} M, on remarque une absence du phénomène de coagulation aux différentes valeurs de cisaillement.
- L'effet du cisaillement : cet effet est visible non pas sur la tendance de la courbe comme on l'a vu pour la concentration en sel mais sur la vitesse pour atteindre le plateau de stabilisation. Pour un cisaillement de 210 s^{-1} (c) le plateau est atteint après 3min pour la concentration de 10^{-1} M et 24 min pour la concentration de 10^{-2} M. Pour 10^{-3} M, on observe une absence de cinétique de coagulation due à la faible force ionique fournie dans la solution.

La Figure IV-15 nous indique que la vitesse de coagulation croît avec la concentration en sel et le cisaillement appliqués à la solution. Ce qu'on observe sur les trois courbes c'est un équilibre entre la force ionique présente dans la solution et la force de cisaillement appliquée, c'est-à-dire une concentration suffisante pour former des agrégats et un cisaillement assez fort pour les former en augmentant la probabilité de choc et assez doux pour ne pas les casser.

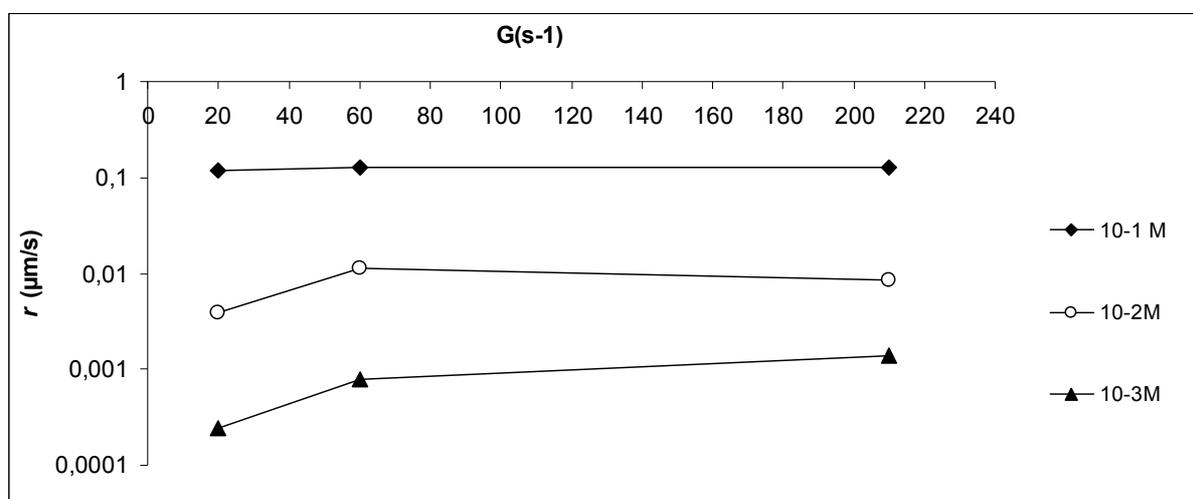


Figure IV-15: la cinétique d'agrégation exprimée en échelle logarithmique en fonction du cisaillement à 10^{-1} , 10^{-2} et 10^{-3} M de NaCl.

IV.1.5. Approche numérique de la cinétique d'agrégation

Les présents résultats obtenus dans le paragraphe ci-dessus peuvent être comparés à l'approche numérique de la simulation de l'agrégation des particules à du modèle développé par Thill (A.Thill et al., 2001). L'idée est de comparer l'évolution de la taille des agrégats avec celle que fournit le modèle pour un cisaillement donné. Cependant, pour prédire l'évolution temporelle il faut également introduire l'efficacité de collage entre les particules (α) et la dimension fractale (d_f) des structures d'agrégat. Ces valeurs ont été estimées de manière itérative en comparant les courbes numériques et expérimentales de l'évolution du

D50 pour chaque cisaillement et concentration en sel (10^{-1} et 10^{-2} M) Figure IV-16 ; Pour la concentration de 10^{-3} M vu l'absence du phénomène d'agglomération, cette analyse n'a pas été effectuée. (Figure IV-14).

En l'absence d'approche expérimentale complète, explorant toute la gamme des cisaillements jusqu'à 2.10^{+3} s^{-1} , nous avons utilisé le modèle de Thill aux faibles cisaillements (20, 60 et 210 s^{-1}) pour ensuite extrapoler sur de grandes valeurs. Cette approche ne permet de fournir qu'une valeur indicative des phénomènes que l'on pourra rencontrer dans le labyrinthe des goutteurs. Les différents paramètres exploités sont synthétisés sur le Tableau IV-2.

α : efficacité de collage entre les particules

d_f : la dimension fractale.

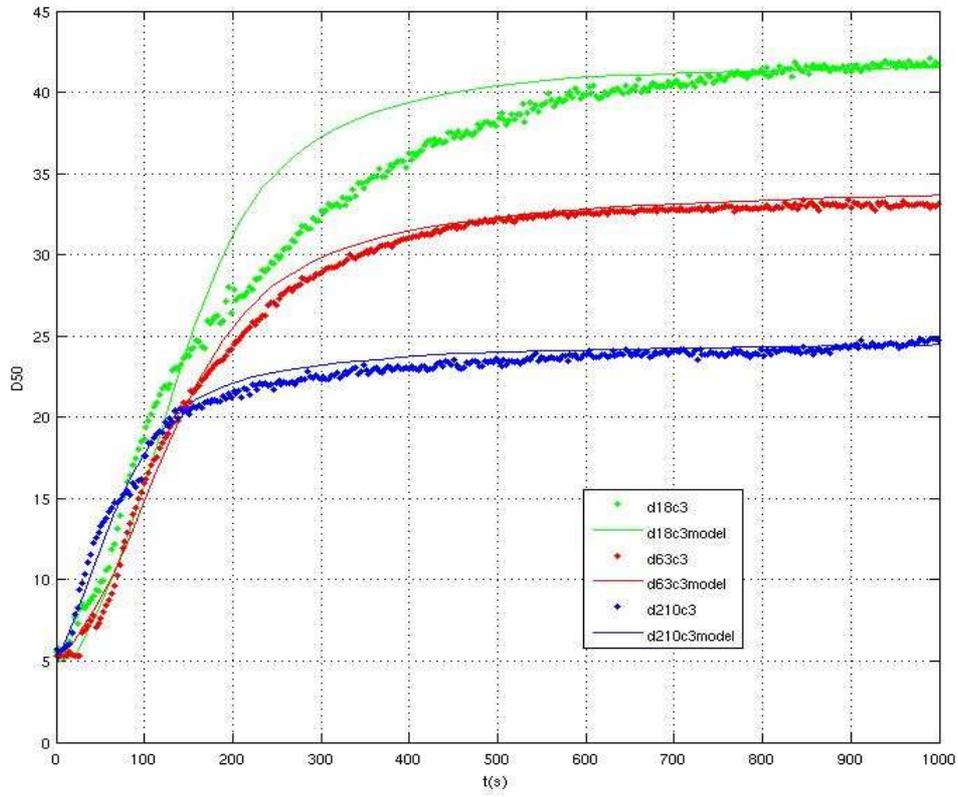
D_{\max} : la taille des particules au-delà de laquelle tous les agrégats sont fragmenter (en μm)

$D_{\max 1}$: la taille des particules lorsqu'elles commencent à se fragmenter sous l'effet du cisaillement (en μm).

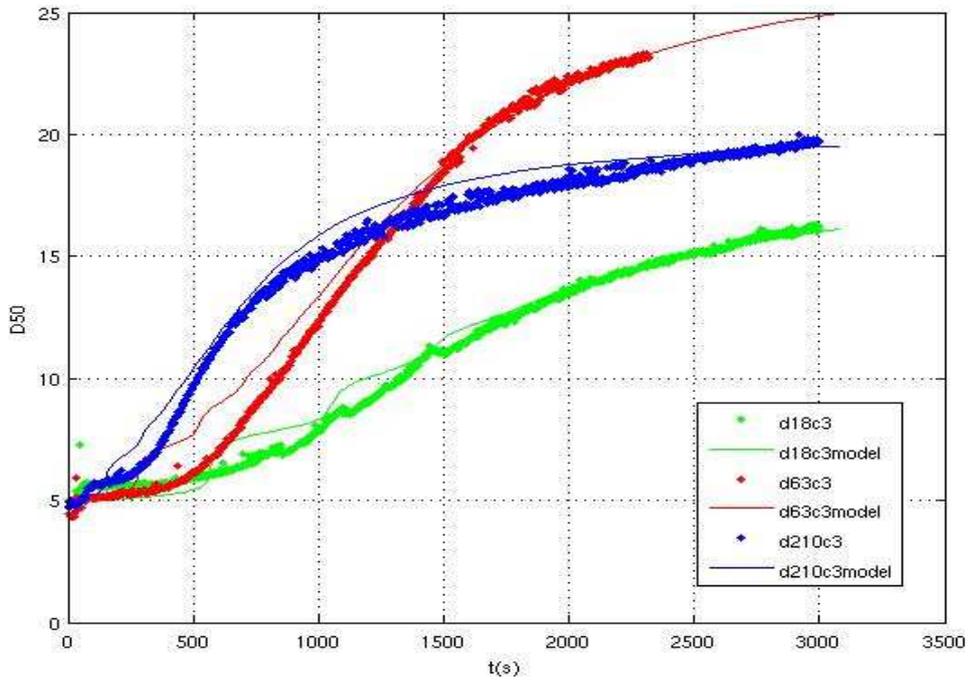
La dimension fractale croit avec l'augmentation du cisaillement. Cette croissance est logique car le cisaillement favorise la probabilité de chocs entre les particules et par conséquent l'accroissement de leur taille

	$G(\text{s}^{-1})$	α	d_f	D_{\max}	$D_{\max 1}$
10^{-2} M	20	0,025	1,5	15	25
	60		1,8	18	35
	210		2,1	15	25
10^{-1} M	20	0,6	1,6	15	55
	60		2,1	18	42
	210		2,32	10	30

Tableau IV-2: Paramètres d'entrées dans le code de Thill pour 10^{-1} M et 10^{-2} M NaCl



(a)



(b)

Figure IV-16 : Calibrage du model de Thill sur les résultats du Taylor-Couette à 10^{-1} M (a) et 10^{-2} M (b) NaCl

On observe sur les courbes de la Figure IV-16, une augmentation de la cinétique d'agrégation qui a une efficacité de collage plus importante à 10^{-1} M de NaCl ($\alpha=0,6$) que à 10^{-2} M, ($\alpha=0,025$) du fait de l'augmentation de la force ionique de la solution et la probabilité de chocs entre les particules, qui favorise leur collage. On remarque aussi (Tableau IV-2) que la valeur de la dimension fractale D_f augmente avec la valeur du taux de cisaillement.

Suite à ce calage du modèle de Thill sur nos données expérimentales, ce modèle peut être utilisé pour nous donner une indication de ce que pourrait être l'agrégation pour des taux de cisaillement très importants.

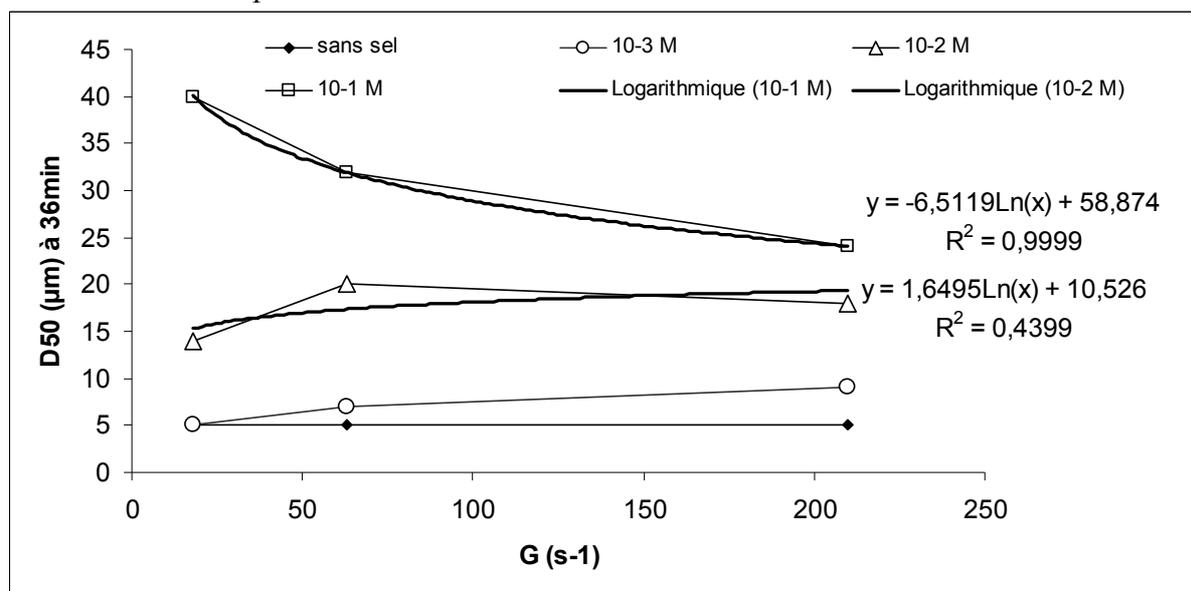


Figure IV-17 : Extrapolation de taille de floc pour $G = 1000 \text{ s}^{-1}$

L'extrapolation de la taille des particules pour un cisaillement de 10^3 s^{-1} se fait à partir des équations des courbes de tendance (Figure IV-17). Pour la concentration de 10^{-1} M, on obtient un $D(50)$ qui vaut $13 \mu\text{m}$; pour une concentration 10^{-2} M on obtient un diamètre de $15 \mu\text{m}$ pour le même cisaillement.

Concentration	Equation e la courbe de tendance	$D50 (\mu\text{m})$ à $G=10^{+3} \text{ s}^{-1}$
10^{-1} M	$D(50) = -6.5119 \text{Ln}(\tau) + 58.874$	$15 \mu\text{m}$
10^{-2} M	$D(50) = -1.5965 \text{Ln}(\tau) + 24.614$	$13 \mu\text{m}$

Tableau IV-3 : Extrapolation des tailles de particule à $G=10^{+3} \text{ s}^{-1}$ à partir des courbes de tendance

Pour de faibles concentrations en sel, le cisaillement a peu d'impact sur la taille finale D_{max} (Figure IV-17). Par contre pour des concentrations plus fortes le cisaillement va avoir tendance à diminuer ou à augmenter le $D50$. Dans le cas de 10^{-1} M les agrégats formés sont plus gros qu'à 10^{-2} M. Le fait d'augmenter le cisaillement, aboutit à une plus grande fragmentation des agrégats, alors que pour 10^{-2} M il favorise leur agglomération. Malgré ces tendances contradictoire, à l'agrégation d'une part à 10^{-2} M de NaCl, et à la fragmentation d'autre part à 10^{-1} M de NaCl, il semble qu'on tende vers une même taille d'équilibre lorsque le cisaillement augmente (Figure IV-17) qui est de : $D50 \approx 20 \mu\text{m}$. Cependant, en l'absence d'expérience menée à $G \approx 10^3 \text{ s}^{-1}$, nous ne sommes pas en mesure

d'affirmer que l'augmentation de G ne va pas provoquer la rupture des agrégats et donc une diminution du Dmax.

IV.2. Étude du colmatage des goutteurs en laboratoire

IV.2.1. Méthodes pour caractériser la cinétique de colmatage des goutteurs à long terme

Pour déterminer quels sont les facteurs qui induisent le bouchage des goutteurs, des expériences ont été menées au sein du laboratoire du CEMAGREF. Ces expériences consistent à tester les deux argiles déjà caractérisées (IV.1) et leur capacité à colmater les goutteurs en faisant varier la force ionique de la solution, la température ou la quantité d'argile présente dans la solution, sur une durée de 20 jours minimum.

La démarche vise à comprendre les phénomènes de colmatage sous conditions contrôlées (taille et type de particules, charges ioniques, température) de façon à identifier les divers processus en jeu, en particulier les conditions hydrauliques (vitesse de l'écoulement, taux de cisaillement et temps de repos), ainsi que leurs interactions.

Le montage (Figure IV-18) est composé de :

- six lignes de goutteurs type GR à cheminement long avec un débit de 2 l/h. Sous chaque ligne, des gouttières permettent de récupérer l'eau qui s'en écoule et de la réinjecter dans le réservoir. Cette manœuvre a pour but de travailler à concentration constante et de garder un volume constant dans les réservoirs.
- six réservoirs de 50 L remplis avec de l'eau potable filtrée à 3 µm dans lesquels l'agitation de l'eau est assurée en circuit fermé, une pompe alimente chacune des lignes à partir de l'eau du réservoir ; chaque réservoir possède deux pompes, l'une qui alimente les goutteurs et l'autre pour agiter la suspension de bentonite.

Une suspension qui alimente les lignes de goutteurs est une eau chargée (mélange argilo-calcaire, ou bentonite) à 200 mg/l. Ce mélange est préalablement préparé dans un bécher d'un litre à 8g/L et homogénéisé par agitation magnétique avant d'être diluée dans les 40 L d'eau claire contenue dans chaque réservoir. La pompe qui joue le rôle d'agitateur est mise en marche pour homogénéiser le mélange. Après cinq minutes la pompe d'alimentation est mise en marche pour alimenter les goutteurs. La température de la solution est maintenue inférieure à 23°C par un échangeur de chaleur plongé dans le réservoir. La pression dans les lignes est maintenue à 1 bar. Le débit de chaque goutteur est mesuré quotidiennement, par pesée de la suspension recueillie sous le goutteur pendant 5 minutes. Le débit massique est converti en débit volumique.

Au cours de cette expérience, les paramètres qu'on a fait varier afin d'étudier leur effet potentiel sur le colmatage des goutteurs sont :

Mélange argilo-calcaire :

- le temps de fonctionnement sur les six lignes. Deux lignes fonctionnent une heure par jour et les quatre autres, huit heures par jour ;

- la température de la solution : Une seule ligne fonctionne huit heures par jour à une température inférieure à 23°C, puis à 40°C entre le 8eme et le 9eme jour.

Bentonite :

Etant donnée l'absence d'effet du sel NaCl sur la dispersion colloïdale du mélange argilo-calcaire, les expériences de suivi du débit à différentes concentrations en sel NaCl ont été menées uniquement avec la bentonite. Les tests ont été effectués avec des concentrations en NaCl de 0, 10^{-3} et 10^{-2} M

Les deux tableaux ci-dessous résument le schéma expérimental pour les deux types d'argile.

Mélange argilo-calcaire :

Lignes 1 et 2	1 h/j
Lignes 3, 4, 5 et 6	8 h/j

Bentonite :

Ligne 1	0 M/l NaCl
Ligne 2	10^{-3} M/l NaCl
Ligne 3	10^{-2} M/l NaCl

Tableau IV-4 : Récapitulatif du protocole expérimental

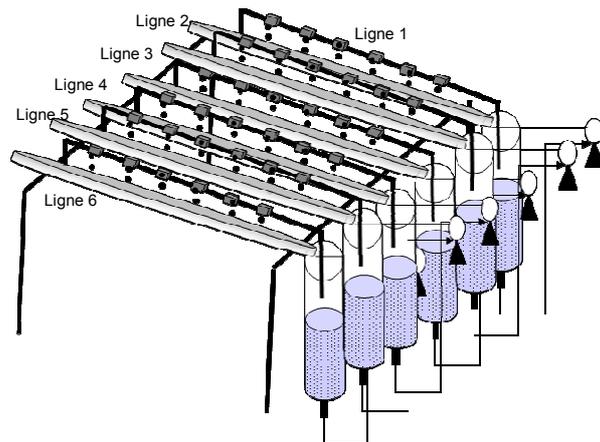


Figure IV-18 : Banc d'essai pour le mélange argilo-calcaire

IV.2.2. Influence de la charge en particules sur les débits à court terme

Nous avons cherché à mettre en évidence l'impact de la quantité d'argile présente dans une solution, sur le débit des goutteurs. Pour ce faire, des capteurs de masse HBM® de type SP4C3-MR (Figure IV-19) ont été mis en place pour suivre en continu l'évolution du débit. Ce suivi instantané permet de déceler des variations très faibles de débit par rapport au débit mesuré en eau claire.

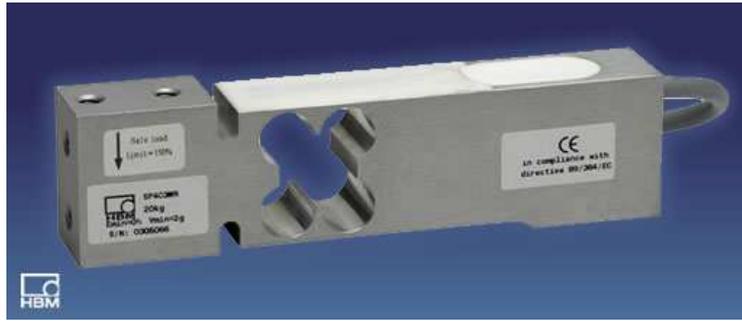


Figure IV-19 : Capteur de masse SP4C3-MR

Les capteurs sont reliés à une station d'acquisition (spider8®). La cadence d'acquisition est d'une mesure par seconde. La sensibilité de mesure des capteurs est de 2 pour 10000. Les mesures sont enregistrées en continu. L'eau recueillie est reversée périodiquement dans le réservoir, afin d'y maintenir un niveau constant.

La préparation de la suspension eau+mélange argilo-calcaire, est identique aux protocoles précédents (IV.2.1). On a testé sur 8h et sur une seule ligne neuve l'impacte de la charge de la suspension sur les débits des goutteurs. Cette charge varie de 0.1 jusqu'à 1g/L avec un pas de 0.1. On effectue les mesures suivantes :

Des mesure en eau claire sont faites préalablement sur la ligne, afin d'avoir un référence de débit des goutteurs.

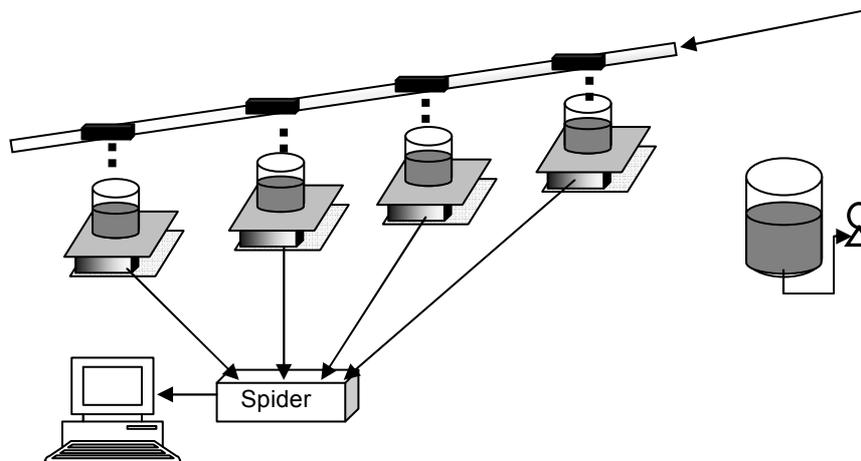


Figure IV-20 : Schéma représentatif du principe de l'expérimentation

IV.2.3. Résultats pour le mélange argilo-calcaire

IV.2.3.1 Effet de la durée quotidienne de fonctionnement sur le colmatage par le mélange argilo-calcaire

Au cours de cette expérience, les lignes de goutteurs 1 et 2 ont été mises en fonctionnement 1h par jour, alors que les lignes 3 à 6 ont fonctionné 8 h par jour.

- **Paliers de fonctionnement court (1 h/jour)**

Les résultats sont représentés sur les figures suivantes. Chaque courbe correspond à un goutteur. La variation observée entre les goutteurs au temps 0 exprime l'hétérogénéité de fabrication de ces derniers.

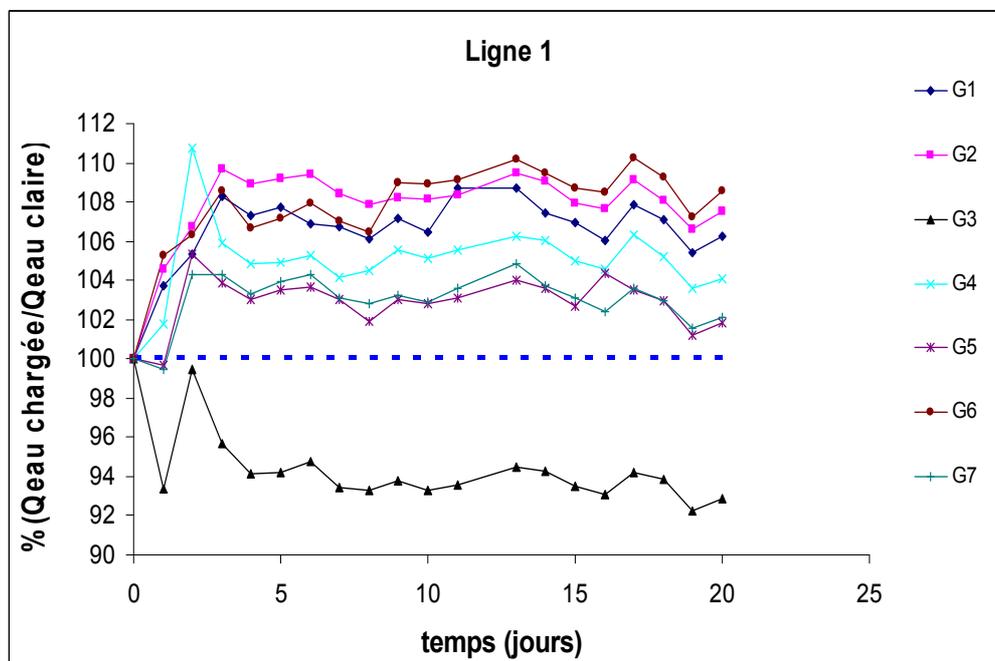


Figure IV-21 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour la ligne 1 (1h/jour)

Les goutteurs de la ligne 1 comme ceux de la ligne 2 (Figure IV-22) ne présentent aucune forme de colmatage, car on n'observe pas de chute du débit par rapport à celui mesuré en eau claire au bout des 20 jours que durait l'expérience.

Au contraire, le débit en eau chargée est légèrement supérieur à celui mesuré en eau claire. Ce décalage est constant au cours du temps et homogène sur tous les goutteurs de la ligne 1. Sous réserve que ce résultat ne soit pas biaisé par un problème de métrologie (variabilité de fonctionnement des pompes par exemple), deux hypothèses permettent d'expliquer ce phénomène :

1. L'eau chargée à 200 mg/L de mélange argilo calcaire présente une rhéologie différente, plus fluide elle favorise l'écoulement dans le labyrinthe.
2. Les particules déposées dans le labyrinthe des goutteurs tendent à lisser les aspérités, ce qui contraint la circulation de l'eau selon un circuit moins perturbé. Ce phénomène est d'autant plus probable que l'augmentation de débit apparaît avec un jour de délai en moyenne.

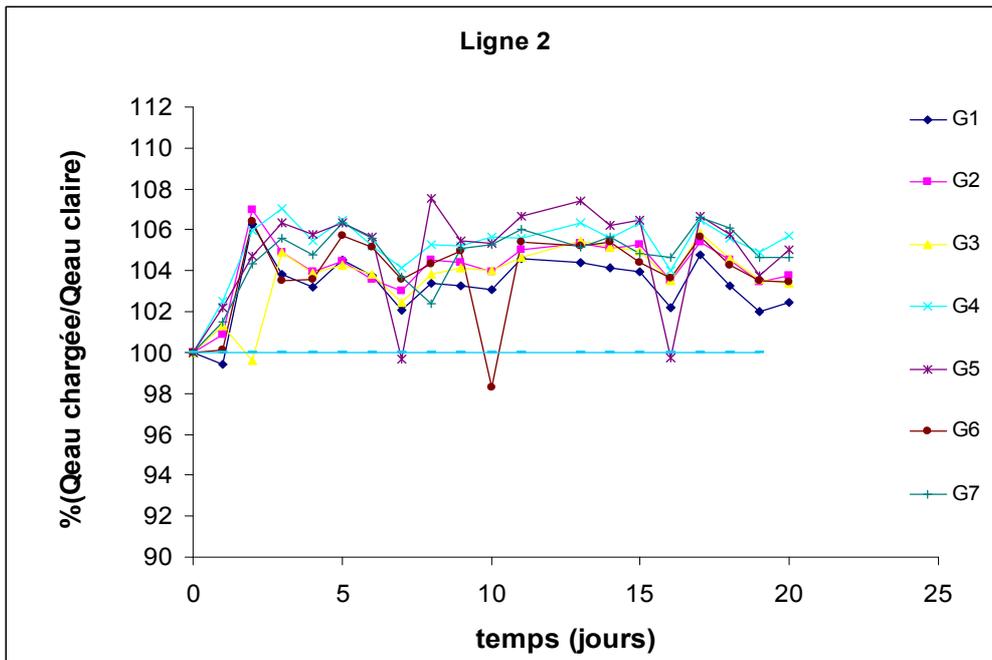


Figure IV-22 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour la ligne 2 (1h/jour)

La Figure IV-23 nous montre que la variation des débits des goutteurs en fonction du débit mesuré en eau claire (E_c) augmente de 5%. Cette hausse est maintenue ensuite durant toute la période des expériences. Les deux lignes gardent une très bonne homogénéité malgré la qualité de l'eau.

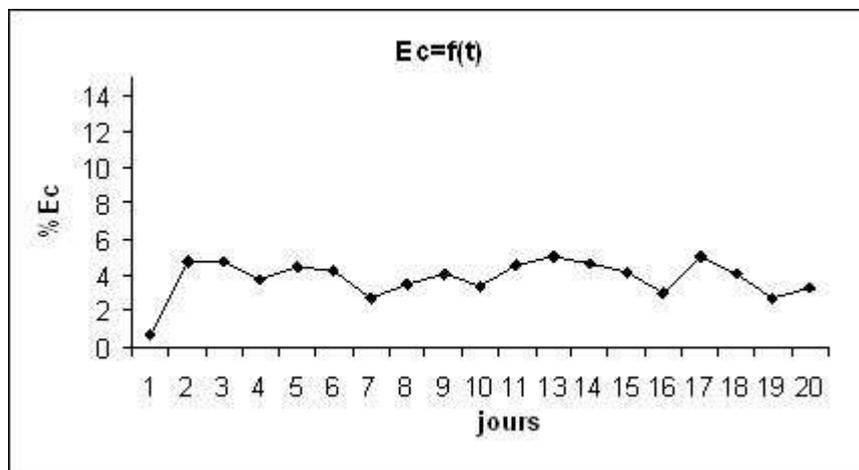


Figure IV-23 : Evolution temporelle du E_c pour les lignes 1 et 2 fonctionnant 1h/jour

- **Paliers de fonctionnement longs (8h/jour)**

Sur les 4 lignes restantes, on a appliqué le même protocole de prélèvement que celui utilisé pour les deux lignes avec un fonctionnement de 8h par jour. Les résultats (Figure IV-24) montrent que la plupart des goutteurs ont un débit légèrement plus important que celui observé en utilisant de l'eau claire. Néanmoins on observe certains jours que des goutteurs délivrent un débit moindre comme dans le cas de la ligne 3-goutteur 6 ou la ligne 4-goutteurs 7 et 6 ou même un colmatage quasi-total du goutteur 4 de la ligne 6. Ce colmatage apparaît donc de façon aléatoire, quelle que soit la ligne ou la position du goutteur. Il est néanmoins

réversible car on remarque ensuite un retour du débit à sa valeur initiale. On peut faire l'hypothèse que des particules ou des amas obstruaient le labyrinthe du goutteur et ont été évacués du fait des variations de pression lors de la mise en route du système.

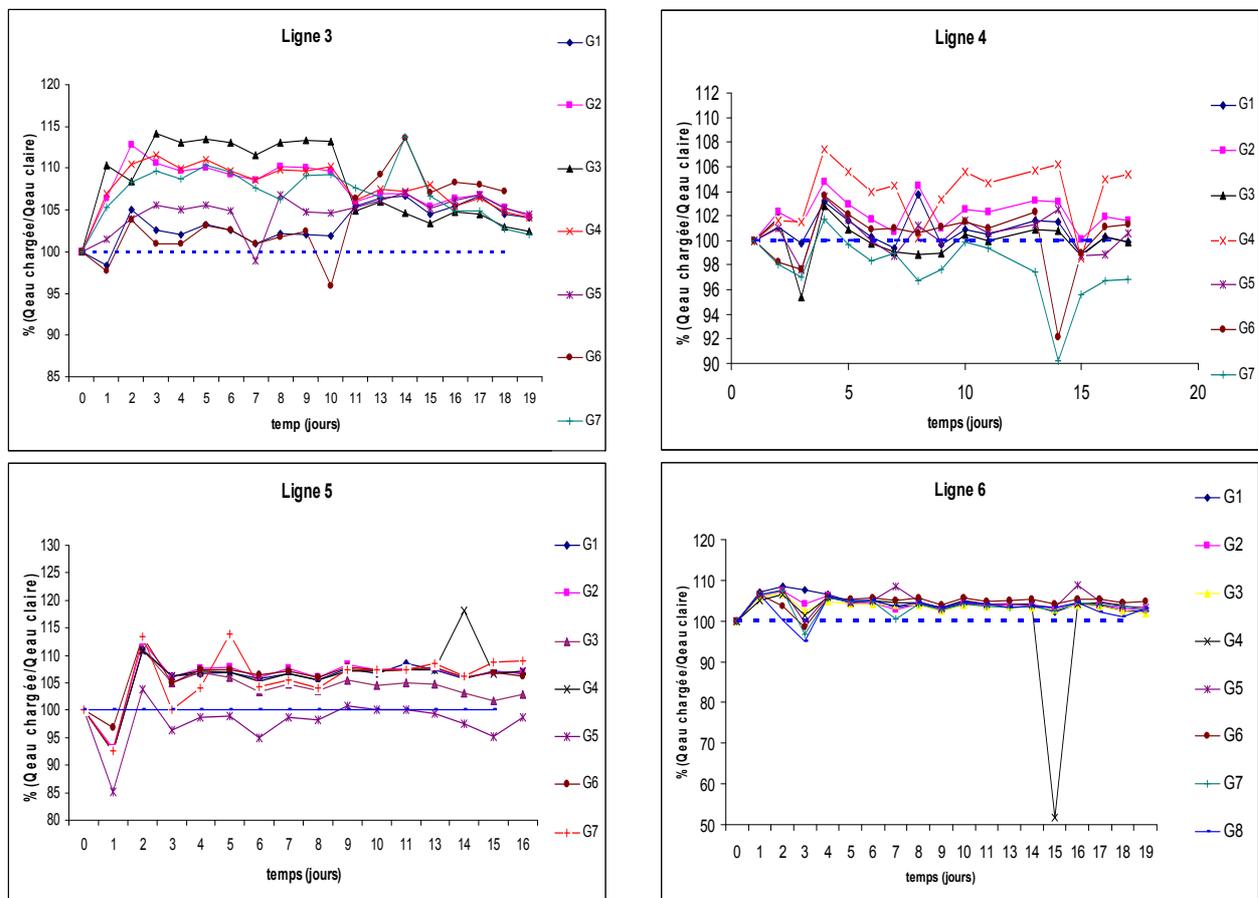


Figure IV-24 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour les lignes 3, 4, 5 et 6 (8h/jour)

Le comportement des goutteurs dans cet essai reste similaire à celui des essais sur 1h/jour. La Figure IV-24 montre que le débit moyen des 6 lignes reste au-dessus du débit nominal de 5% environ. Toutefois des périodes de débit plus faibles sont observées mais ne durent pas, on ne peut donc pas affirmer qu'un colmatage s'est mis en place.

Pour les lignes 3, 4, 5 et 6, on atteint une valeur du E_c qui vaut 7% (Figure IV-26) avec des fluctuations pour au final retrouver le même coefficient qu'au premier jour.

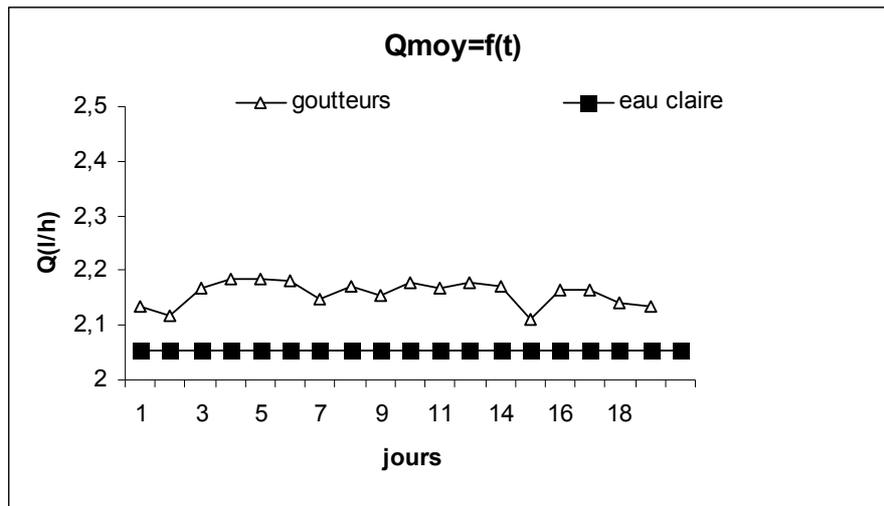


Figure IV-25 Evolution temporelle du débit moyen sur les lignes 3, 4, 5 et 6 (8h/jour)

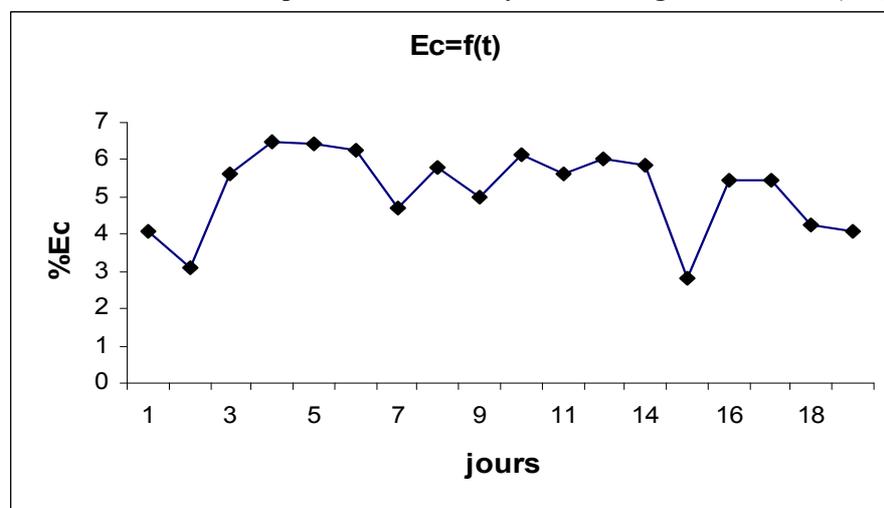


Figure IV-26 : Evolution temporelle de Ec sur les lignes 3, 4, 5 et 6 (8h/jour).

IV.2.3.2 Influence de la température sur le colmatage

Sur une vingtaine de jours de fonctionnement à raison de 8h par jour, l'augmentation de la température de l'eau de 23°C à 40°C a provoqué le colmatage quasi-instantané et irréversible des trois goutteurs 1, 3 et 10 (Figure IV-27).

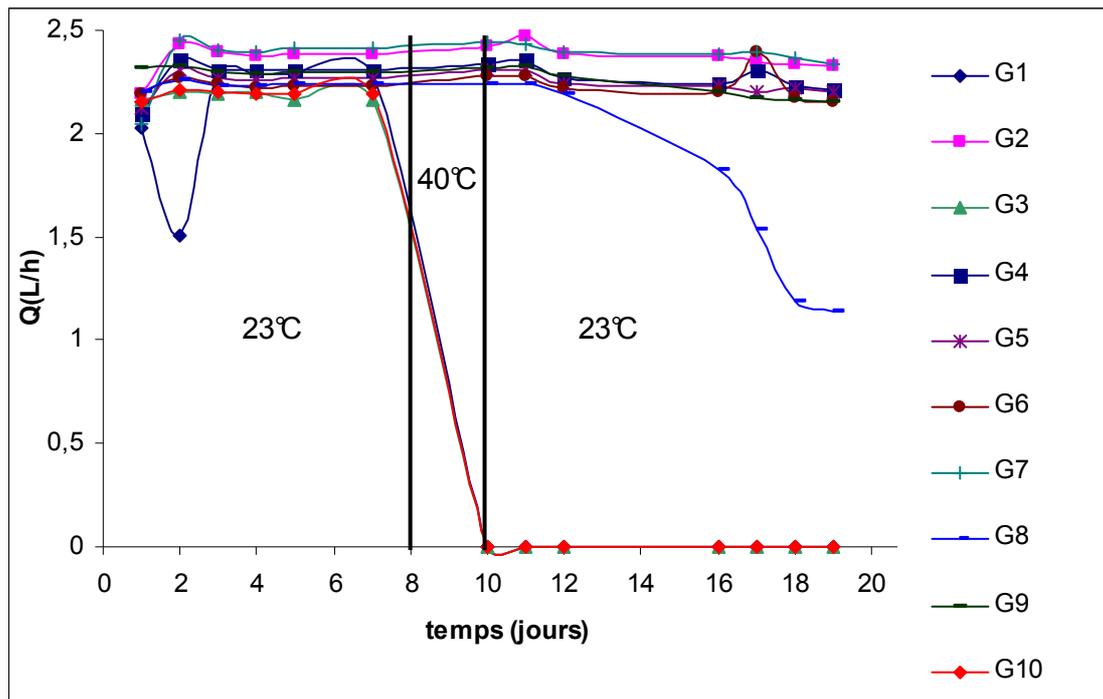


Figure IV-27 : Evolution temporelle du débit des goutteurs

Pour caractériser l'homogénéité de la ligne, dans le cas d'un colmatage d'un ou de plusieurs goutteurs, le calcul du coefficient d'uniformité n est plus pertinent, dans ce cas, on calcule le nombre de goutteurs dont le débit a diminué de 30% ou plus par rapport au débit de référence Q_0 (l'eau claire).

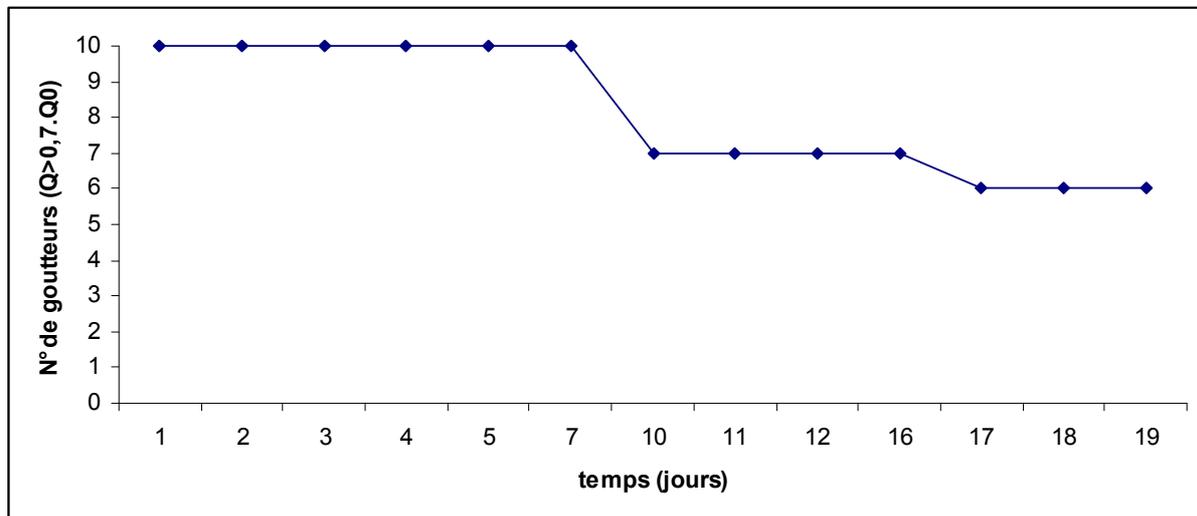


Figure IV-28 : Nombre de goutteurs dont le débit est supérieur à 70% du débit en eau claire (Q_0)

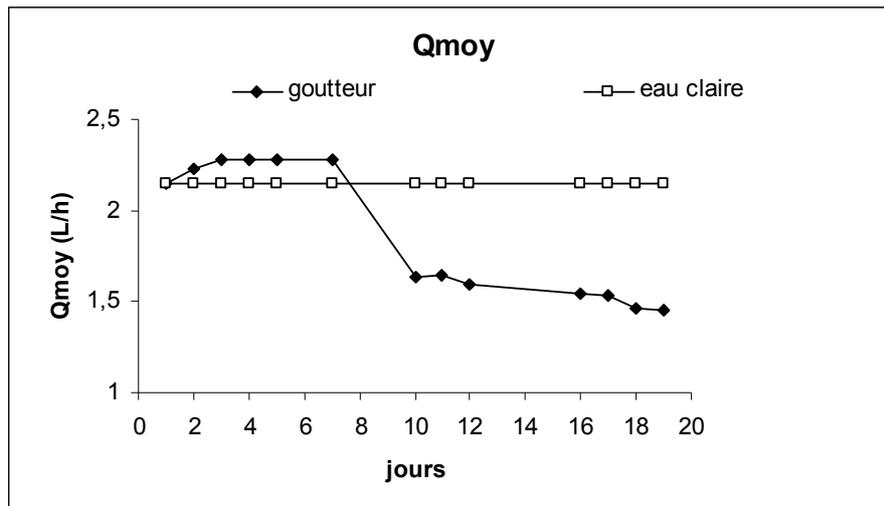


Figure IV-29 : Evolution temporelle du débit moyen

L'observation des trois goutteurs colmatés au microscope révèle une obstruction presque totale de la grille d'entrée et un bouchon au niveau du labyrinthe ; ce bouchon a l'aspect d'un biofilm comme illustré. Figure IV-30 Mis à part ces trois goutteurs et un quatrième qui est partiellement colmaté, la ligne a fonctionné parfaitement pendant toute la durée de l'essai. L'absence de colmatage physique n'est pas étonnant, vu le caractère inerte du mélange argilo-calcaire, qui est peu soumis aux phénomènes d'agrégation ; par contre, avec des températures plus élevées, on crée des conditions favorables au développement des biofilms (Figure IV-30) qui tendent à piéger les particules et à colmater le système.

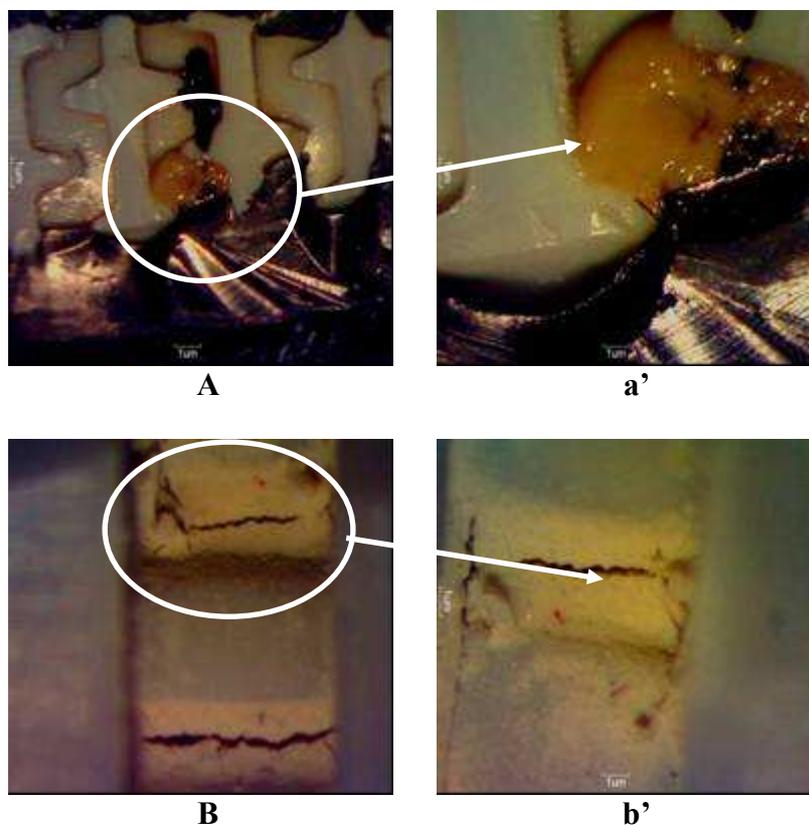


Figure IV-30 : Photographie du colmatage dans le labyrinthe (a et a') et dans la grille d'entrée (b et b'), pour les goutteurs numéro 3 et 8 et sur le

IV.2.3.3 Influence de la charge en particules sur les débits dans les goutteurs

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure IV-31. Au cours de nombreux essais à différentes concentrations, ils montrent une légère augmentation (<2%) du débit immédiatement après injection de particules et durant toute la période d'essai. Cette augmentation intervient dans des proportions moindres que ce qu'on a pu observer sur les premiers essais (environ 5%).

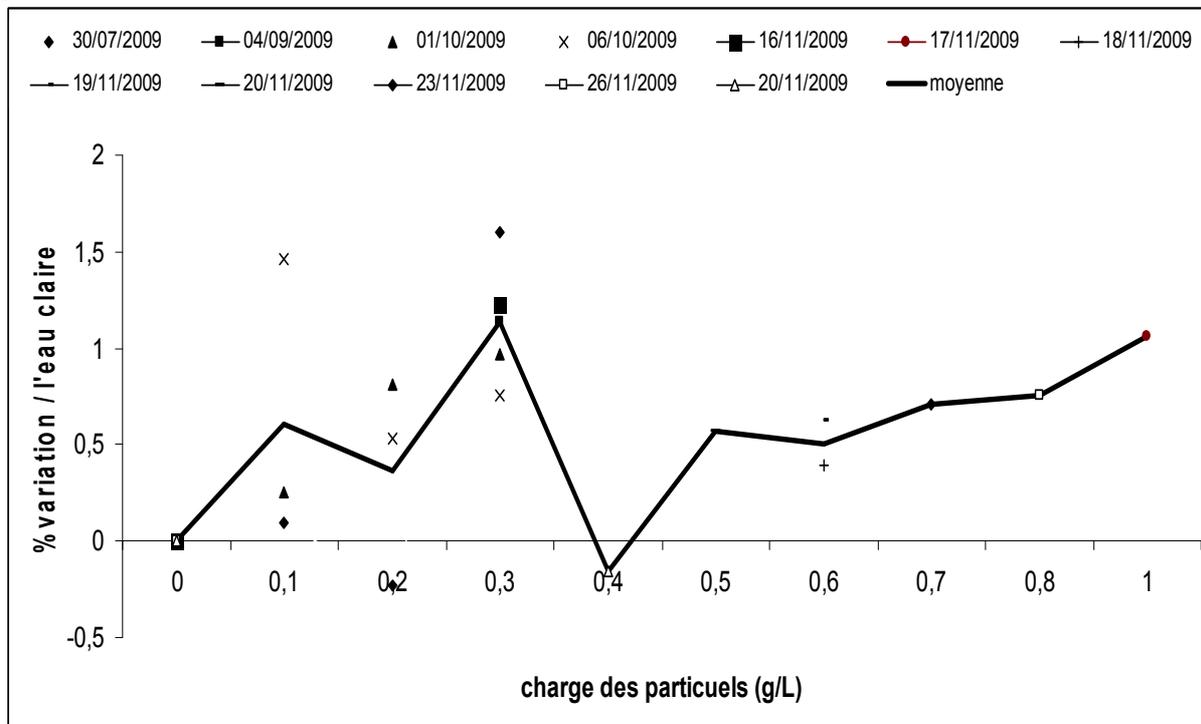


Figure IV-31 : Suivi des débits par pesées en continu sur le mélange argilo-calcaire

Les résultats observés ici ainsi que certains des précédents posent un certain nombre de questions :

- sur l'expérimentation elle-même :
 - est-on sûr de la stabilité de la pression?,
 - peut-il y avoir un effet de la température sur le comportement de la solution?,
 - quelle est l'influence du temps de fonctionnement sur la mise en place de ce phénomène ?
 - peut-il y avoir un effet de la vitesse d'écoulement dans la ligne ?
- sur la nature des phénomènes qui peuvent entrer en jeu :
 - y aurait-il un effet des particules sur la modification de la viscosité de la suspension et l'hydrodynamique de l'écoulement?,
 - les particules pourraient-elles colmater les micro-aspérités du goutteur (effet électrostatique des parois, négligé dans les simulations numériques, et modifier les frottements aux interfaces eau-parois ?

Les réponses à ces questions n'ont pu être apportées dans le cadre du présent travail et feront l'objet de travaux futurs mixant expérimentation (avec observation des particules en nombre, taille et forme) et calcul numérique.

IV.2.4. Résultat pour la bentonite

La bentonite, dont la cinétique d'agrégation en fonction du cisaillement et de la concentration en sel NaCl a été mesurée en chapitre (IV.1), montre une stabilité colloïdale beaucoup plus sensible à la force ionique que le mélange argilo-calcaire. L'effet de son agrégation sur le colmatage des goutteurs a donc été étudié en utilisant une eau chargée en bentonite et dopée à différentes concentrations de NaCl.

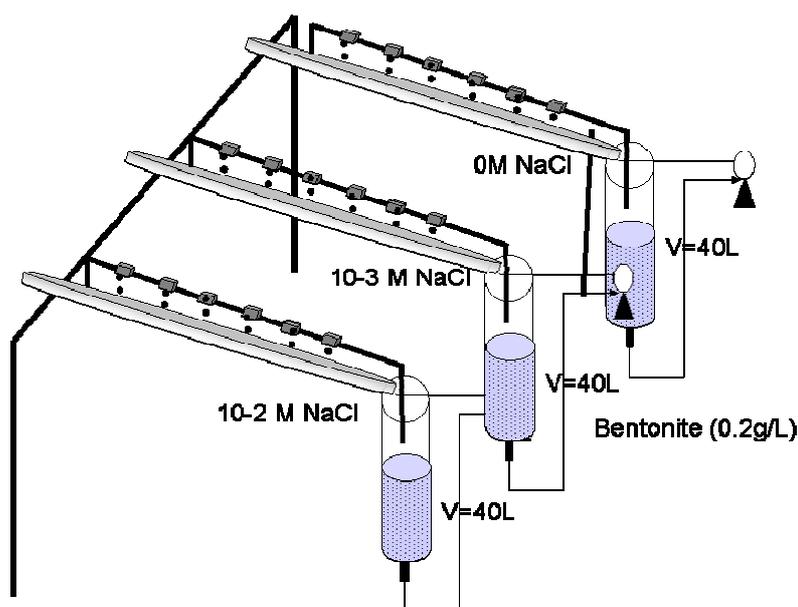


Figure IV-32 : Schéma du système utilisé pour les tests de colmatage

IV.2.4.1 Comparaison de différentes concentrations en NaCl

(a) Sans sel

Les tests ont été faits sur cette ligne avec le mélange eau claire+bentonite, sans injection de sel NaCl

La Figure IV-33 montre qu'un colmatage se produit sur certains goutteurs dès les premiers jours d'irrigation avec une eau chargée en bentonite, même en absence de sel. Sur les dix goutteurs testés pour cette ligne, on remarque que le goutteur n°8 a subi plusieurs colmatages réversibles depuis le premier jour, puis irréversible à partir du 27ème jour. Les goutteurs n°1,2,3, et 5 se sont colmatés directement de manière irréversible à partir des jours 3, 17, 36 et 39 respectivement. Le goutteur 6 s'est colmaté progressivement dans le temps. Enfin, les trois autres goutteurs se sont maintenus à un débit à peu près constant pendant toute la durée du test. Le colmatage semble être indépendant de la position du goutteur, aussi bien en ce qui concerne son intensité que sa réversibilité. Il se fait donc de manière aléatoire le long de la ligne. De plus, contrairement à ce qui a été observé pour le mélange argilo-calcaire, le débit moyen des goutteurs est toujours inférieur à celui que l'on observait en eau claire.

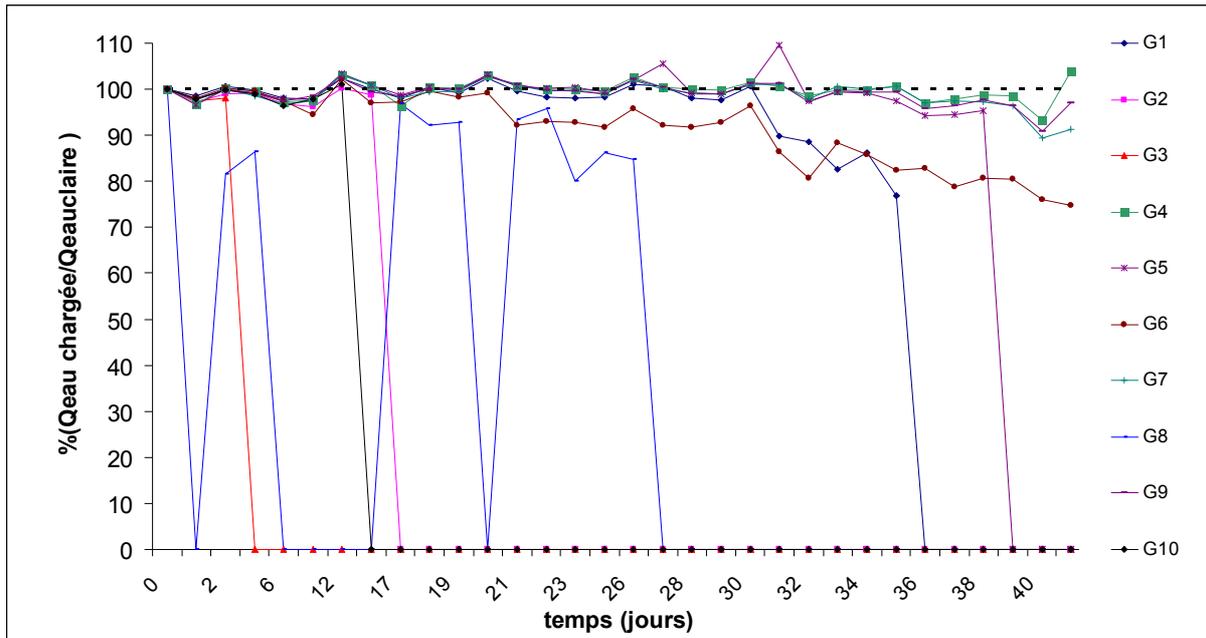


Figure IV-33 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour $[NaCl]= 0 M$ (8h/jour)

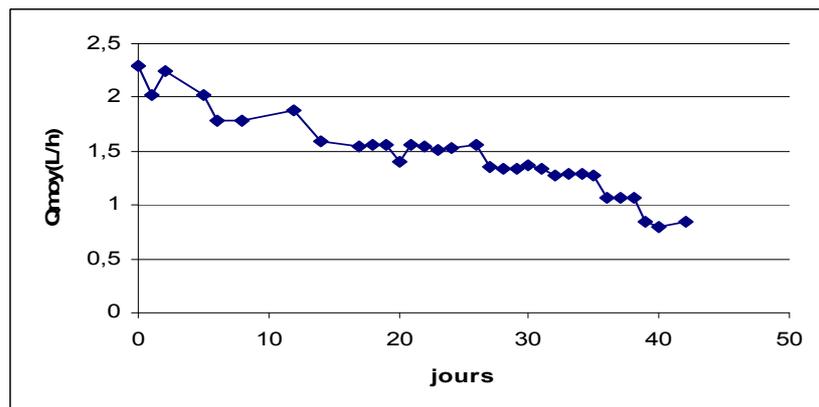
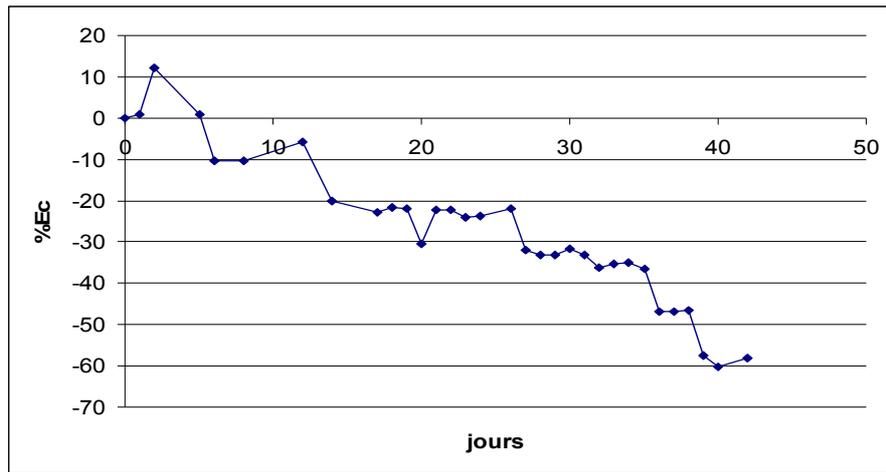
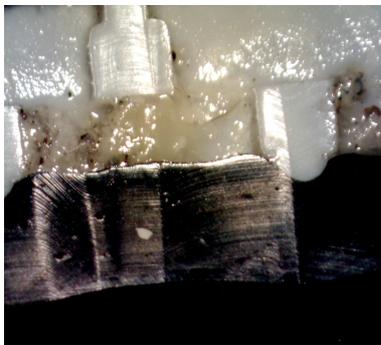


Figure IV-34 : Evolution du débit moyen de la ligne dans le temps (charge particulaire de l'eau = $0.2g/L^*$; $[NaCl] = 0M$)

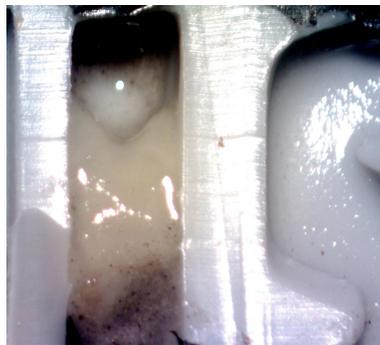
Le débit moyen des dix goutteurs qui fonctionnent juste avec un mélange d'eau du robinet filtrée à $3 \mu m$ et de $200 mg/l$ de bentonite, chute progressivement durant toute la période de test (Figure IV-34), malgré quelques augmentations ponctuelles liées au décolmatage de certains goutteurs ou une variation de pression dans le refoulement de la pompe qui influe sur la vitesse dans la rampe ainsi que dans le labyrinthe. La Figure IV-35 indique une diminution de 60% du débit moyen des 10 goutteurs par rapport à l'état initial c'est-à-dire juste avec de l'eau claire sans bentonite.



FigureIV-35 : L'évolution temporelle du %Ec par rapport au débit en eau claire



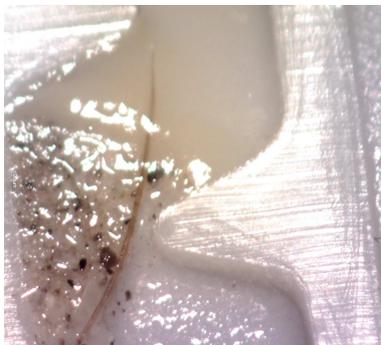
G1



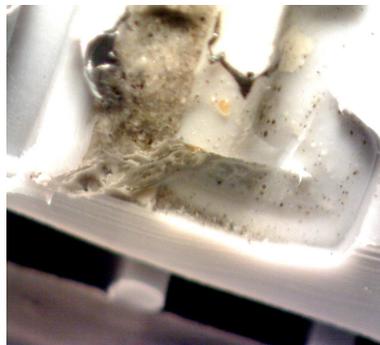
G2



G3



G5



G8



G10

(a)

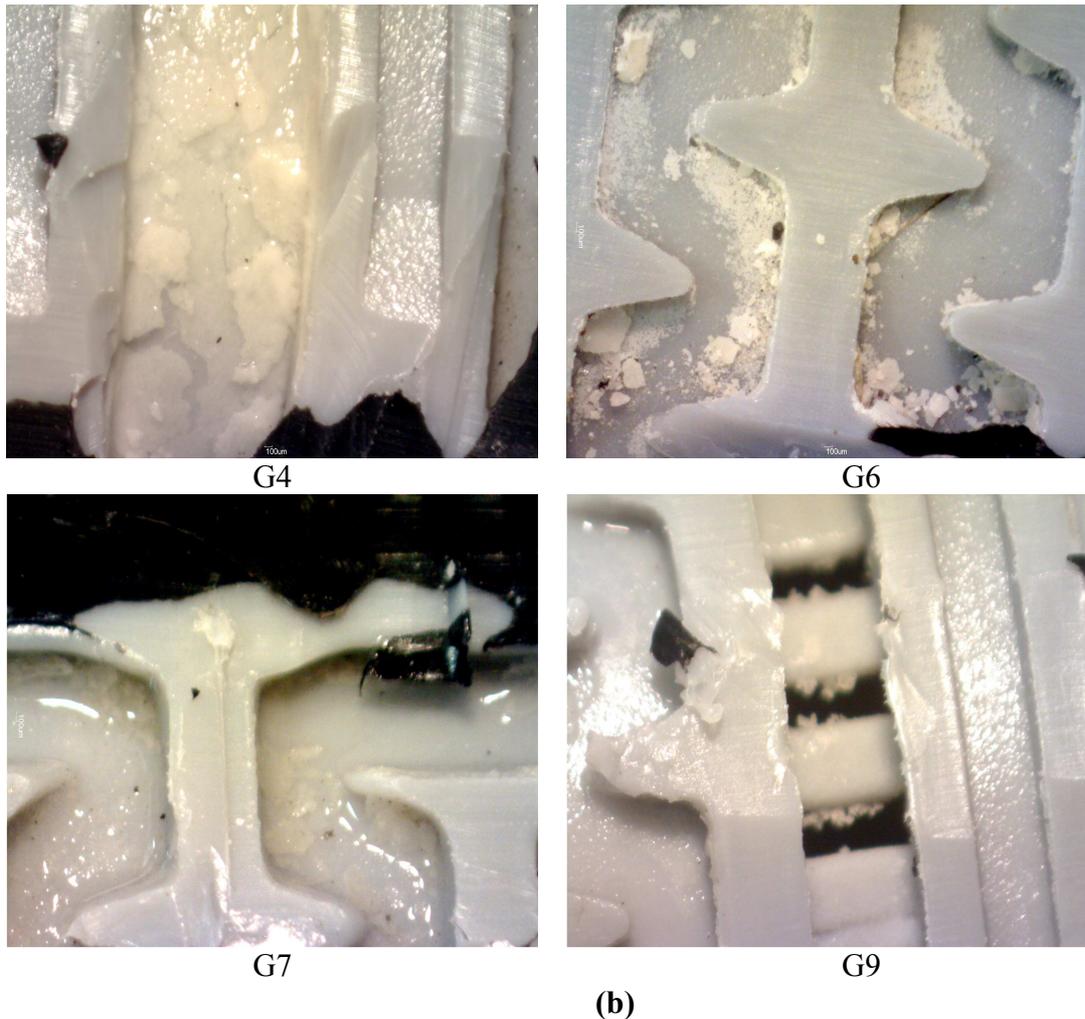


Figure IV-36 : Vue sous microscope de l'état du labyrinthe pour le cas sans sel sur les goutteurs colmatés (a) et non-colmatés (b)

L'expérience d'irrigation avec une eau chargée en bentonite sans sel est très intéressante au point de vue du comportement de la bentonite, car elle a permis de colmater six goutteurs sur les dix, malgré la stabilité de cette argile dans ces conditions. L'observation des goutteurs colmatés sous microscope (Figure IV-34) montre la formation de gel combiné à des particules qui obstrue les labyrinthes. La formation de ce gel est certainement due à l'alternance de fonctionnement de la ligne, dans laquelle pendant les périodes de repos, l'eau s'écoule et la concentration en bentonite augmente au-delà de sa transition sol/gel (Abend, 1999).

(b) À 10^{-3} mol/l de NaCl

La ligne 2 est composée de dix goutteurs alimentés par un mélange d'eau filtrée à $3 \mu\text{m}$, chargée de 200 mg/l de bentonite et dopée en NaCl à 10^{-3} mol/l . La présence de sel monovalent dans la solution a pour effet de favoriser la coagulation des argiles et de former des agrégats ; ce phénomène d'agrégation est différent selon le régime d'écoulement, caractérisé par les contraintes de cisaillement (IV.1.3).

La Figure IV-38, indique que la présence de sel à faible concentration (10^{-3} mol/l) influe considérablement sur l'intensité du colmatage car on remarque :

- que les débits en général sont inférieurs à celui de l'eau claire
- que le goutteur 2 se colmate complètement et irréversiblement à partir du 8ème jour
- que le débit du goutteur n°5 chute de 50% au 38ème jour puis revient rapidement à sa valeur initiale.
- que finalement 90% des goutteurs sont définitivement colmatés au bout de 40 jours de tests.

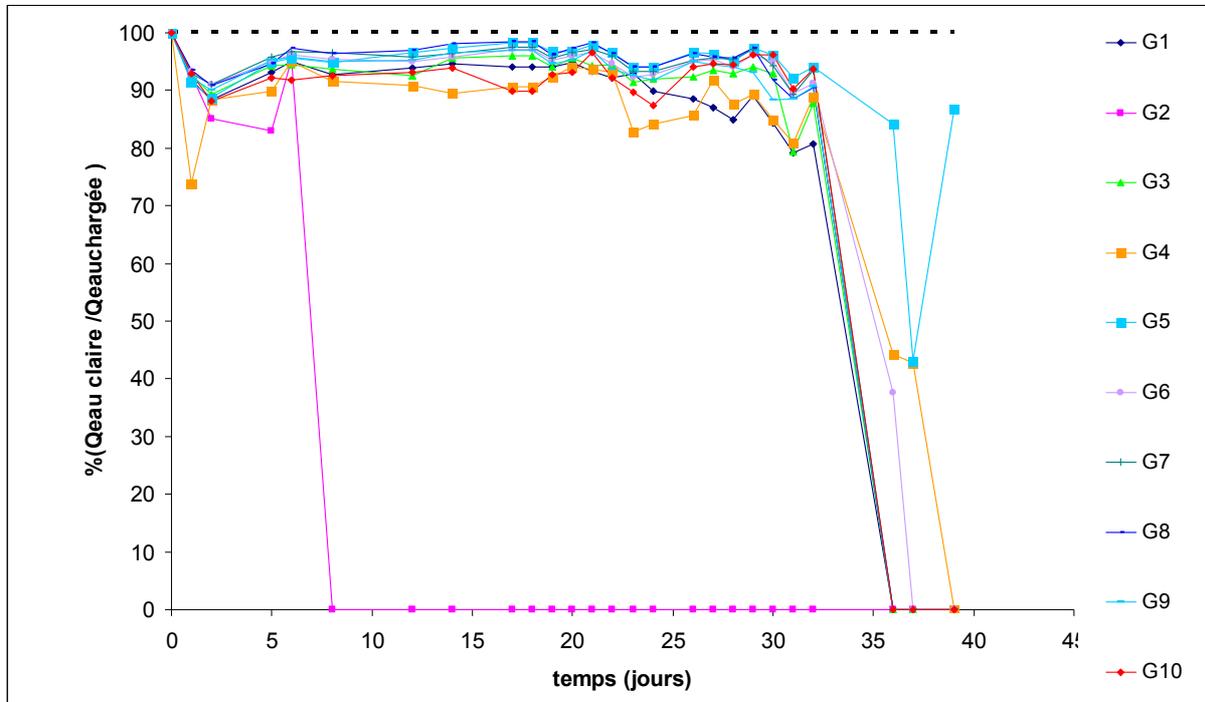


Figure-IV-37 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour $[NaCl]= 10^{-3}M$ (8h/jour)

Le débit moyen des dix goutteurs a une valeur initiale aux alentours de 2 l/h (Figure IV-38), mais chute fortement à une valeur presque nulle au bout de 40 jours.

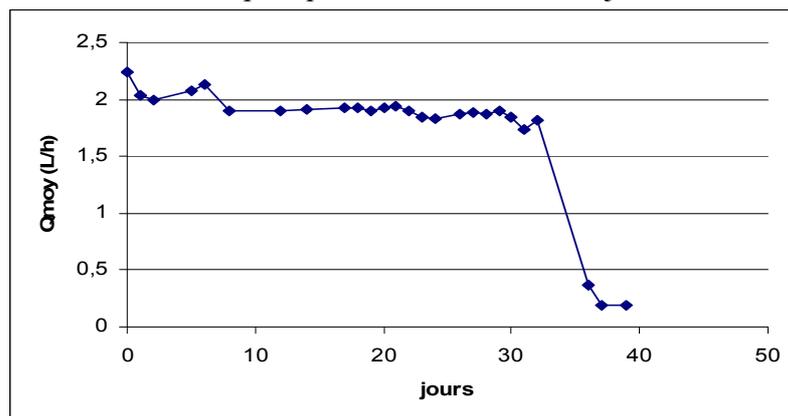


Figure IV-38 : L'évolution temporelle du débit moyen pour la concentration de $10^{-3} M$ zn NaCl

La chute du débit correspondante par rapport au débit initial (eau filtrée + 200 mg/l de bentonite) est de 90% (Figure IV-38), ce qui rend la rampe complètement inutilisable.

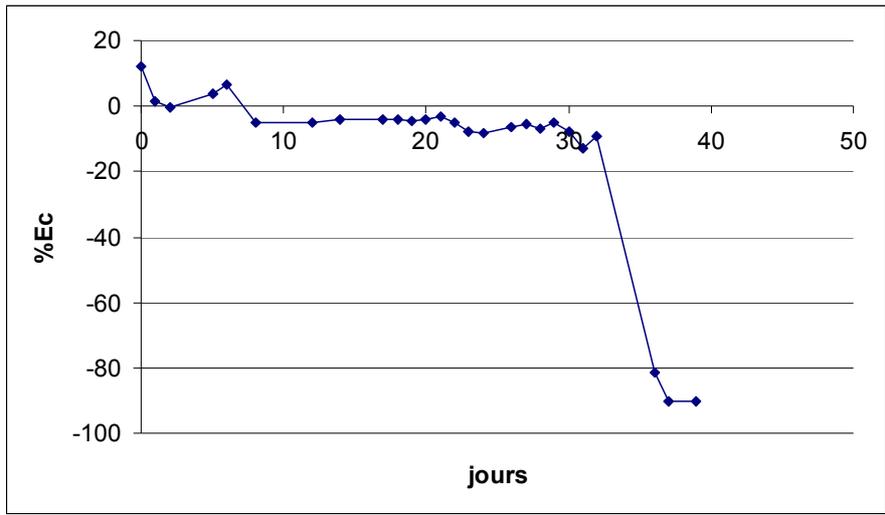
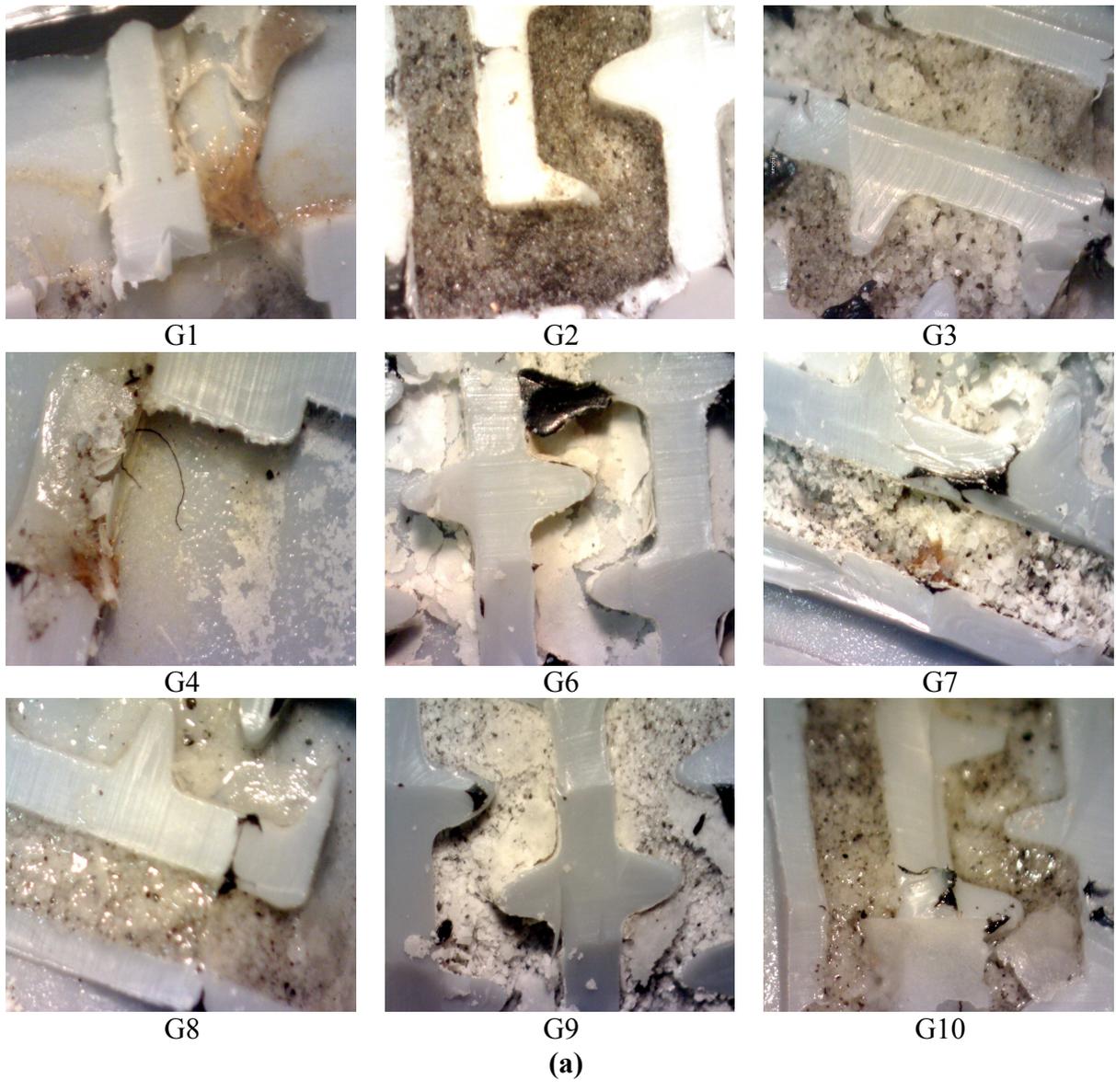


Figure IV-39 : L'évolution temporelle du %Ec pour la concentration de 10^{-3} M zn NaCl





G5

(b)

Figure IV-40 : Vue sous microscope de l'état du labyrinthe pour le cas 0.001M NaCl, sur les goutteurs colmatés (a) et non-colmaté (b)

L'observation des goutteurs au microscope (Figure IV-40) montre un développement important de gel probablement encore d'argile, et un dépôt de matière fibreuse. Le gel est distribué de manière apparemment arbitraire dans le labyrinthe, En revanche, les fibres apparaissent dans les zones où la vitesse est nulle. Leur origine est peut être issue de matériaux détachés du filtre.

(c) à 0.01 mol/l de NaCl

La troisième ligne est composée aussi de dix goutteurs alimentés par un mélange d'eau du robinet filtrée à 3 μ m, chargée de 200 mg/l de bentonite et enrichie en NaCl à 10⁻² mol/l. La Figure IV-41 montre que la plupart des goutteurs de la ligne conserve un débit supérieur au débit nominal défini par le constructeur (2 l/h), et inférieur à celui de l'eau claire, sauf pour quelques goutteurs comme le n°3 qui s'est colmaté de façon irréversible dès le 2ème jour, et le goutteur n°7 qui se bouche brusquement (il passe de 2.2 l/h à 0 l/h) dès le 5ème jour, mais retrouve un débit normal après 33 jours de colmatage. Le goutteur n°1 a vu ses débit diminuer périodiquement durant la période de test.

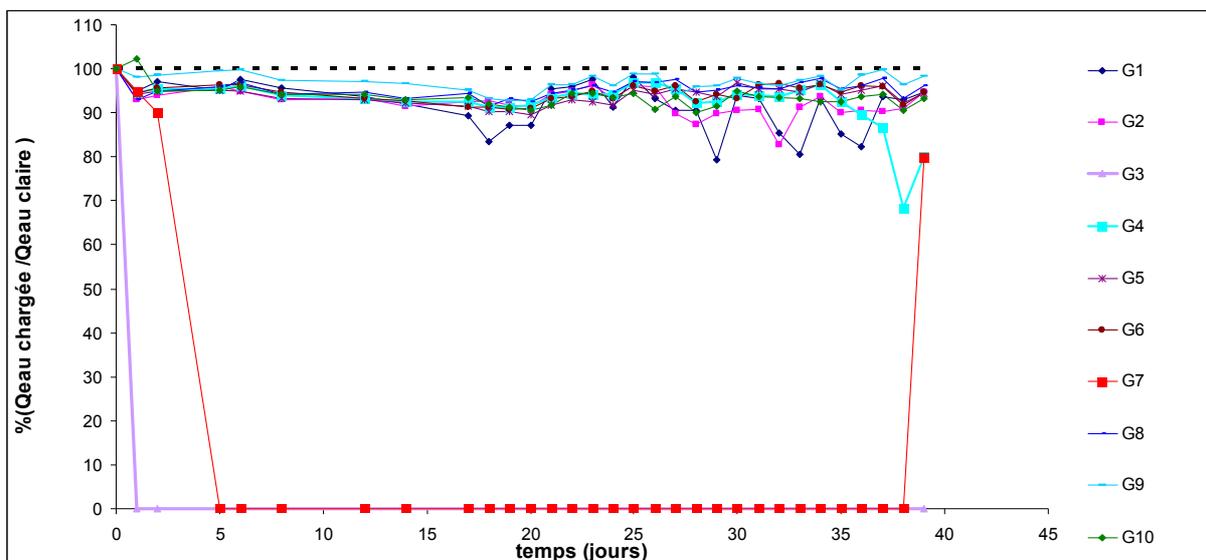


Figure IV-41 : Evolution du débit pour chaque goutteur par rapport au débit en eau claire durant toute la période des tests, pour [NaCl]= 10⁻²M (8h/jour)

Le débit moyen des dix goutteurs (Figure IV-42) diminue surtout au cours des premiers jours pour être inférieur à 2 l/h et il varie entre 1.6 et 1.7 l/h. La légère augmentation observée en fin de période de test, est due au décolmatage du goutteur n°7 (Figure IV-41).

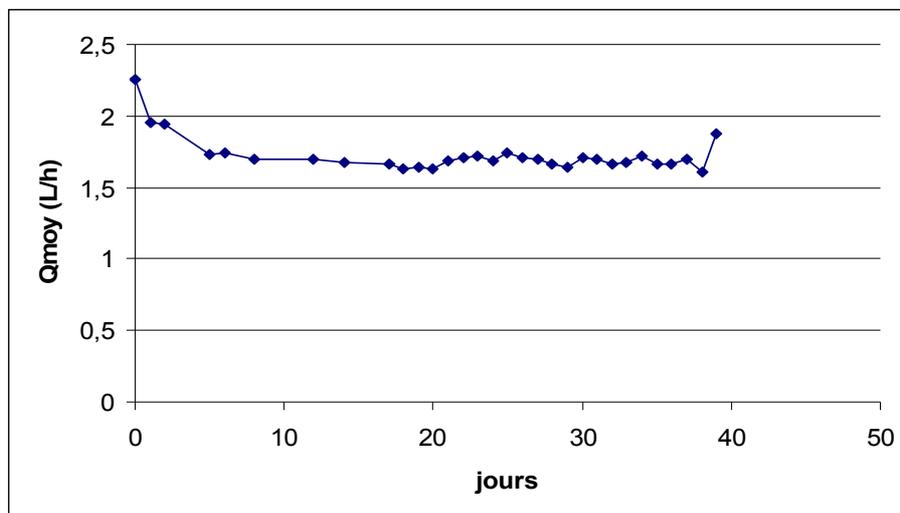


Figure IV-42 :L'évolution temporelle du débit moyen pour la concentration de 10^{-2} M zn NaCl

Le débit moyen diminue progressivement au cours du test, jusqu'à 30% de moins que le débit en eau claire (Figure IV-43), mais remonte à 17% quand le goutteur n°7 se décolmate. Le coefficient d'uniformité chute fortement dès qu'un goutteur se bouche complètement, ce qui nous amène à dire que la ligne présente une hétérogénéité et qu'elle n'assure pas l'irrigation à un point où l'émetteur est obstrué.

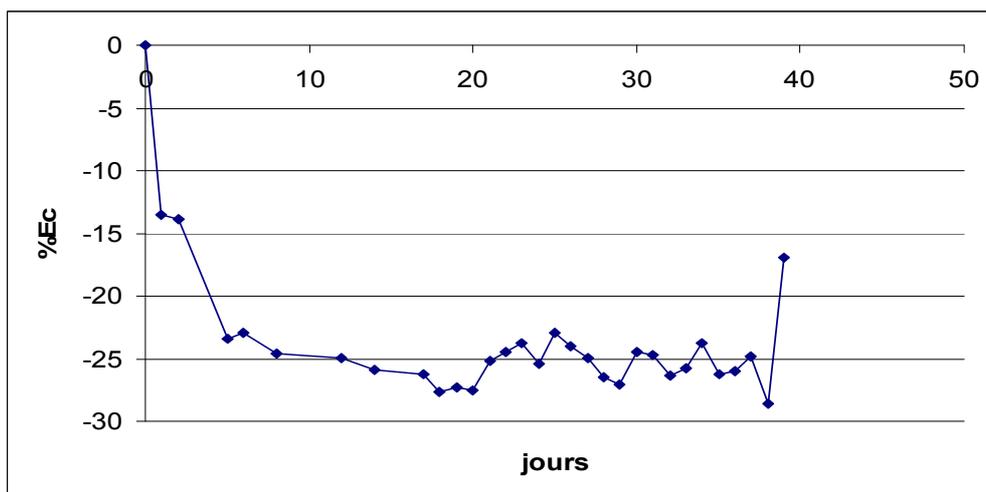


Figure IV-43 : évolution temporelle du %Ec par rapport à la moyenne du débit mesurée en eau claire



G3
(a)



G1



G2



G4



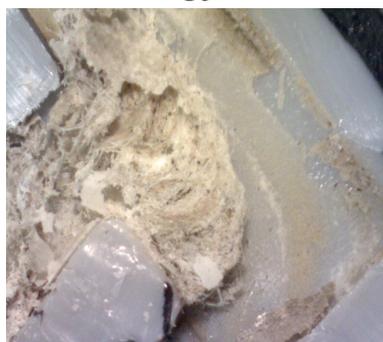
G5



G6



G7



G8



G9



G10

Figure IV-44 : Vue sous microscope de l'état du labyrinthe pour le cas 0.01M NaCl, sur les goutteurs colmatés (a) et non-colmaté (b)

L'observation des goutteurs colmatés après 40 jours de fonctionnement au microscope montre des dépôts à l'aspect sableux d'une part, une prolifération biologique de type biofilm d'autre part, et encore sur certains goutteurs la matière fibreuse. Malgré le manque de caractérisation

de ces dépôts, on remarque ici que l'absence de gel de bentonite se corrèle avec meilleur débit de la ligne au cours du temps. On peut donc supposer que c'est le gel minéral qui contrôle majoritairement le colmatage des goutteurs. Son absence à la concentration en NaCl (10^{-2} mol/L) s'explique par le mécanisme d'agrégation de l'argile par coagulation, qui donne lieu à des agrégats de structure plus dense (gel attractif) que le gel typiquement obtenu à faible force ionique et forte concentration particulaire (gel répulsif). De plus, dans le cas de la concentration en sel 10^{-2} M, la bentonite est normalement déjà partiellement agrégée dans le bac d'alimentation de la ligne. Son transfert via l'eau d'irrigation à travers la ligne et ses goutteurs est certainement différent de celui des particules parfaitement dispersées. Par exemple, il est très probable que les agrégats soient soumis à la sédimentation dans la ligne, et tendent à se déposer au fond de celle-ci, plutôt qu'à circuler en boucle avec la solution.

IV.2.5. Bilan sur les trois lignes :

La Figure IV-45 ainsi que le Tableau IV-5, nous montre l'état des 3 lignes en fin d'expérimentation. On remarque qu'elles ne sont pas en mesure de répondre aux besoins, car les 2 lignes alimentées par une solution sans sel et une à 0.001M NaCl sont complètement inexploitable au point de vue irrigation puisqu'elles distribuent l'eau de manière très hétérogène et celle de 0.01 M frôle la limite des 30% au dessous de la valeur prise en eau claire, malgré une remontée de la variation au dernier jour du test, due à un décolmatage.

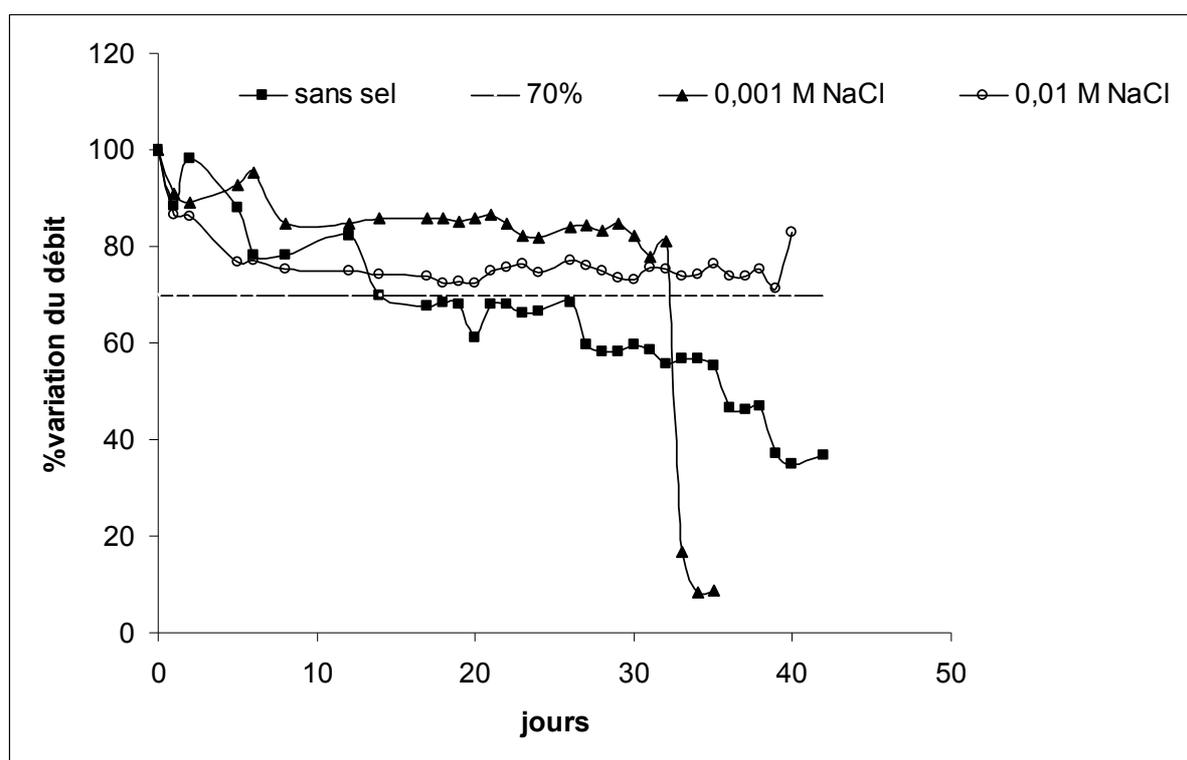


Figure IV-45 : La variation du débit dans le temps pour les 3 concentrations de sel.

	Sans sel	10^{-3} M NaCl	10^{-2} M NaCl
Goutteur colmaté	6	9	1
Goutteur non-colmaté	4	1	9
N° Goutteur	1, 2, 3, 5, 8, 10	1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10	3

Tableau IV-5 : Récapitulatif des résultats sur les trois lignes tester à différents concentration en sel.

Conclusion et Perspectives

Les différents phénomènes qui conduisent au colmatage des goutteurs de micro-irrigation sont nombreux et complexes. Notre objectif s'est limité à l'étude du colmatage physique.

Dans une première étape, nous avons identifié la nature du problème dans des conditions réelles : notre travail s'est déroulé dans le cadre d'une exploitation agricole pratiquant l'irrigation localisée à partir des eaux de la Durance, filtrées à 80 μ m. Des prélèvements d'eau ont été effectués en différents points du système d'irrigation, afin de caractériser le comportement de la matière argileuse en suspension. La diffraction par rayon X a révélé l'existence prédominante de deux types d'argile, la kaolinite et la smectite. Il apparaît que le colmatage physico-chimique prédomine nettement.

Parallèlement, des mesures par granulométrie laser ont mis en évidence une augmentation de la taille des particules entre le début et l'extrémité des lignes de distribution d'eau. Ces résultats confortent l'hypothèse d'une agglomération des particules suivie de leur dépôt, qui aboutit au colmatage des goutteurs malgré l'installation d'un système de filtration en tête des lignes. Ce phénomène peut s'accroître en fonction de l'évolution de la charge solide de l'eau utilisée qui peut être plus élevée après des épisodes d'orages sur certains secteurs du bassin amont. Il peut être réduit par la pratique de purges régulières en fin des lignes de distribution d'eau.

Dans une seconde étape, nous nous sommes concentrés sur l'étude du colmatage physique à partir de particules argileuses en conditions contrôlées. Nous avons alors cherché à comprendre plus en détail comment l'agglomération de ces particules argileuses peut impacter l'obstruction des goutteurs, et quels sont les facteurs qui favorisent ces processus d'agglomération et de dépôt.

Pour cela, nous avons choisi deux types d'argile parmi celles que nous avons identifiées après analyse par diffraction aux rayons X des eaux de la Durance. Ce choix est motivé par la réactivité de ces argiles : l'une est un mélange argilo-calcaire relativement stable en suspension et l'autre, sensible aux mécanismes d'agglomération, est une bentonite. En effet, des analyses de granulométrie ont été effectuées sur des suspensions soumises à différents cisaillements et différentes concentrations en sel (de 0, 10⁻³, 10⁻² et 10⁻¹ mol/L de NaCl). Dans le cas du mélange argilo-calcaire, on n'observe aucune variation de la distribution en taille des particules, qui reste centrée autour de 5 μ m. Par contre, dans le cas de la bentonite, différentes tendances sont observées : la taille des agrégats augmente lorsque la concentration de sel croît ; le cisaillement n'influe pas le processus d'agglomération s'il n'y a pas de sel ; l'augmentation du cisaillement tend à former des agrégats plus gros à faible concentration de sel (10⁻³ et 10⁻² mol) alors qu'il les casse à plus forte concentration de sel (10⁻¹ mol). Ces résultats ont permis d'extrapoler la taille des particules à des valeurs des cisaillements obtenues numériquement dans le labyrinthe.

Nous avons suivi en laboratoire le comportement de trois lignes de dix goutteurs : d'une part en faisant varier les temps de fonctionnement, la charge et la température dans le cas du mélange argilo-calcaire et d'autre part en testant différentes concentrations de sel pour une charge constante de bentonite. Les protocoles mis en place nous ont permis de faire plusieurs observations :

- En conditions contrôlées de température et de charge solide, nous avons observé, dans le cas d'une eau chargée en mélange argilo-calcaire, une augmentation du débit en sortie de goutteurs par rapport à l'eau claire. Des mesures journalières et en continu au moyen

de capteurs de masse ont montré que l'augmentation des débits en sortie de goutteurs était instantanée. Nous supposons que ce comportement du fluide au sein du labyrinthe des goutteurs peut être dû à deux facteurs distincts :

D'une part, en se déposant dans les angles des chicanes, les particules lissent l'écoulement et le déplace vers une trajectoire centrale où la vitesse peut être plus grande, et le cisaillement plus faible.

D'autre part, les particules peuvent interagir avec les petites échelles de l'écoulement et ainsi diminuer l'énergie cinétique de l'écoulement. Cette laminarisation tend à augmenter la vitesse moyenne de l'écoulement dans le labyrinthe.

- La température influe considérablement sur le colmatage car lorsqu'elle dépasse 30°C, elle favorise la formation de biofilms qui peuvent se fixer et se développer sur les parois. Ces biofilms jouent un rôle de rétenteur de particules ou de toute autre matière présente en suspension. A ces dépôts peuvent s'ajouter la précipitation des bicarbonates de calcium lorsque la température dépasse 37°C. Cette observation est importante, car la température dans les rampes d'irrigation peut atteindre 60°C.
- Le temps de fonctionnement n'a aucune influence sur le colmatage, contrairement à l'opinion de l'agriculteur, qui pense que le fractionnement des apports d'eau permet de diminuer l'intensité du colmatage.
- Dans le cas de la bentonite, les résultats n'ont pas pu être expliqués directement par les conditions définies pour chaque essai : l'intensité du colmatage, sa texture et composition étaient très variables ; on observait en effet des dépôts sablonneux, des biofilms, des fibres et des feuillets d'argile, sans que leur présence puisse être reliée à la teneur en sel ou à la taille des agrégats. Une tendance a pu cependant être observée : la concentration en sel avec une eau chargée en bentonite influe sur le colmatage, mais de façon inattendue, en limitant ses effets.

Le point fort reste que le colmatage est très sensible à l'hydrodynamique du fluide, à la température, à la charge massique de la matière en suspension et à la charge électrique de la solution. Les interactions de type électrostatique entre les agrégats et le matériau plastique de fabrication du goutteur sont certainement des facteurs importants à analyser.

Les perspectives pour ce travail qui mériterait d'être prolongé dans plusieurs directions :

- L'étude du colmatage biologique qui nécessite des expérimentations en conditions contrôlées, couplée à une modélisation de l'écoulement.
- L'analyse expérimentale des formes d'écoulement, sur un goutteur transparent pour pouvoir voir le comportement des particules au sein du labyrinthe, et valider l'interpolation réalisée.
- La modélisation de l'agrégation des particules dans le labyrinthe en fonction du cisaillement imposé par la forme des chicanes.
- La modélisation de l'influence de la charge des particules sur les variations des débits en sortie de goutteurs.
- La caractérisation des liens de cause à effet entre le développement d'un biofilm et le dépôt de particules.
- La définition d'indicateurs qui rendent compte du risque de colmatage en fonction de la qualité de l'eau et des conditions hydrauliques.

La modélisation des phases transitoires (en particulier à la mise en eau du système) : lors des phases de remise en eau, les dépôts vont-ils être arrachés ? le fait qu'il y ait de l'eau stagnante favorise-t-il la formation d'agrégats ? Que se passe-t-il à la remise en eau ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Adachi Y. 1995. Dynamic aspects of coagulation and flocculation. *Advances in colloid and Interface Science*, 56, 1-31.

Adin A. and Klein-Banay C.. 1985. Pretreatment of seawater by flocculation and settling for particulates Removal. Human Environmental Sciences, Graduate School of Applied Science and Technology, The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, Israel.

. Abend S, G. Lagaly

B

Bucks, D.A., Nakayama, F.S. and Gilbert, R.G., 1979. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agric. Water Manage.*, 2: 149--162.

BURT, C.M. O'CONNOR, K. and RUEHR, T. 1995. Fertigation. Calif. Polytechnic State Univ., San Luis Obispo, CA.

Borrow G.M. 1973 physical chemistry, 3rd ed., McGraw-Hill Kogakusha, Ltd Tokyo.

BURT, C.M. STYLES, S.W. 1994. *Drip and microirrigation for trees, vines, and row crops*. San Luis Obispo: Irrigation Training and Research Center/California Polytechnic State University. 261 p.

C

CHOSSAT, J-C. 1995. Entretien en micro-irrigation (2^e edition). Collection étude du Cemagref serie *Equipement pour l'eau et l'environnement n°19*. Antony. 72 p

Coles, D., 1965. Transitions in circular Couette flow. *Journal of fluid Mechanics*, 21, 385-425.

Coughlin K. t. and Marcus P. S. 1991. Modulated waves in Taylor-Couette flow. Part 1. Analysis. *Journal of Fluid Mechanics*, 234, 19-46.

F

Fuch, N. 1934. On the stability and charging of the aerosols. *Zeitschrift für Physik* 89: 736-743.

Frenstermacher P. R., Swinney H. L. and Gollub J. P. 1979; Dynamical instabilities and the transition to chaotic Taylor vortex flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 94, 103-128.

G

Gilbert S. and *al.* 1980. Trickle irrigation : emitter clogging and other flow problems. *Agricultural water management*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. p.159-178. 20p.

GILBERT, R.G. NAKAYAMA, F.S. BUCKS, D.A. FRENCH, O.F. and ADAMSON K.C. 1981. Trickle irrigation : emitter clogging and other flow problems. *Agricultural water management*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. p.159-178. 20p.7.
Gardner, K. H. 1999. kinetic models of colloids aggregation. Pp. 509-550 in *Interfacial Forces and Fields , Theory and applications, surfactant Science Series, vol. 85*, Marcel Dekker, inc.

H

Hills, D. J., F. M. Nawaar, and P. M. Waller. 1989. Effects of chemical clogging on drip-tape uniformity. *Trans. ASAE* 32(4):1202-1206

HILLS, D.J., TAJRISHY, M.A. 2000. The influence of filtration on ultraviolet disinfection of secondary effluent for microrrigation. *TASEA* 43 (6);. pp 1499-1505.

HILLS, D. J. NAWAAR, F. M. and WALLER, P. M. 1989. Effects of chemical clogging on drip-tape uniformity. *Trans. ASAE* 32(4):1202-1206.

Hamaker H.C 1937. *physica*,4, 1058.

J

Jun Z., Z Wanhua, T. Yiping, W. Zhengying, L. Bingheng, 2007. "Numerical investigation of the clogging mechanism in labyrinth channel of the emitter", *Int. J. Numer. Meth. Engng*, 70, 1598-1612,

K

Kataoka K. 1986. Taylor vortices and instabilities in circular Couette flows, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, volume 7, Chapitre 9, Ed. Cheremisinoff, (Gulgh Houston).

L

Li, Y.X., Li, G.Y., Qiu, X.Y., Wang, J.D., 2005. Modeling of hydraulic characteristics through labyrinth emitter in drip irrigation using computational fluid dynamics. China.

Li Y., P. Yang, T. Xu, S. Ren, X. Lin, R. Wei, H. Xu, 2008. "CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter. " *Irrig Sci*, 26, 427-438,

M

Mailhol J.C., Château G., Slatni A., Zairi A., 2004. Diagnostic de l'irrigation au goutte à goutte sur tomates de plein champ dans la plaine de la Medjerda.. Eu Prog Wademed, Worshop N°1, Marrakesh, June, 2004.

N

Nakayama, F.S. and Bucks, D.A. 1986. *Trickle Irrigation for Crop Production Design, Operation and Management*, Developments in Agricultural Engineering 9. Elsevier. New York., NY. 383 pp.

Nakayama, F.S. and Bucks, D.A. 1985. Temperature effect on calcium carbonate precipitate clogging of trickle emitters. USA

Nakayama F. S. Bucks D. A. L. Roth & B. R. Gardner Guayule 1991. Biomass Production under Irrigation. *Bioresource Technology* 35 (1991) 173-178 USA.

O

ORON, GIDEON. 1979. Trickle irrigation using treated wastewater. *ASCE Journal of irrigation and drainage div 105* (2), pp 175-189

P

Pitts D;J, D. Z. Haman and AG Smasjstria 1990 - Causes and prevention of Emitter plugging in Micoirrigation System s- Bulletin 258, Florida Cooperative Extension Service , Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

PLOUG, H., GROSSART, H.-P. 1999. Bacterial production and respiration in suspended aggregates - A matter of the incubation method. *Aquatic Microbial Ecology*. Vol 20, issue 1. pp 21-29.

R

RAVINA, I., PAZ, E. 1992. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation science*. Vol 13, Issue 3,. pp 129-139.

Ravina, I., Paz, E., and al. 1997. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. *Agricultural Water management* 33 (2-3). Pp 127-137.

T

TIERCELIN, J. R. 1998. *Traité d'irrigation*. Lavoisier, Technique et Documentation. Paris. 1011 p.

Thill, A., S. Moustier, J. Aziz, M.R. Wiesner, and J. Y. Bottero, "Flocs restructuring during aggregation: experimental evidence and numerical simulation", *Journal of Colloid and Interface Science*, 243, 171-182, 2001.

Thill A., "Agrégation des particules: structure, dynamique et simulation. Application au cas d'un écoulement stratifié: l'estuaire du Rhône.", Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille III, 1999.

Torres, F. E, Russel, W.B. and Shoowaltek, W.R. 1991. Simulations of coagulation in viscous flows. *Colloid interface. Sci*, 145(1) : 51-73.

TAJRISHY, M.A., HILLS, D.J. 1994. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation. University of California. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol 120, issue 4,. pp 716-731.

Tagg R. 1994. The Couette-Taylor problem. *Non linear Science today*, 4, 3, 2-25.

V

Veerapaneni, A. and Wiesner, S. 1996. Hydrodynamics of fractal aggregates with radially varying permeability. *Journal of colloid interface. Sci* 177 : 45-57.

Vigil, R. D. and Ziff, R. M. 1989. On the stability of coagulation-fragmentation population balance. *Journal of Colloid interface. Sci.*, 133(1): 257-264.

Van Olphen, 1977 . An introduction to clay colloid chemistry. 2nd edition, wiley, New York.

W

Wei Qingsong, Shi Yusheng, Lu gang, Dong Wenchu and Huang Shuhuai 2006. Study of hydraulic performance of the eddy channel for drip emitters. China

Wei, Q.S., Shi, Y.S., Lu, G., Dong, W.C., Huang, S.H., 2006 "Study of hydraulic performance of the eddy channel for drip emitters", *Irrig. Drain.*, 55 (1), 61–72.

Wereley, S.T., and. Lueptow, R.M 1998 "Spatio-temporal character of non-wavy and wavy Taylor-Couette flow", *Journal of Fluid Mechanics*, 364, 59-80.

Z

Zhang J., W. Zhao, Z. Wei, Y. Tang, B. Lu, , 2007 "Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitters with arc labyrinth channels", *Computers and Electronics in Agriculture*, 56, 120–129.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude expérimentale du colmatage des dispositifs de micro-irrigation. Il combine deux approches : l'expérimentation in-situ, sur une parcelle agricole irriguée par des eaux de la Durance, et l'expérimentation en laboratoire. Dans un premier temps, l'étude in-situ a permis d'appréhender toute la complexité du mécanisme de colmatage en intégrant diverses conditions climatiques, qualité de l'eau d'irrigation variables et topographie du terrain. Le débit des goutteurs a été suivi sur quatre lignes de 50 goutteurs, alimentées avec des eaux filtrées à 80 μm et non filtrées. Ces données, combinées à l'analyse des eaux et matières en suspension ont permis de conclure que, compte tenu de la faible présence de matières organiques, le colmatage est un phénomène physico-chimique lié à l'agglomération de particules argileuse. Dans un second temps, ces conclusions ont orienté la mise en œuvre de protocoles pour étudier l'impact de l'agglomération de particules d'argiles sur le colmatage en contrôlant les propriétés physico-chimiques de l'eau. Deux types d'argile ont été choisis en fonction de leur réactivité : un mélange argilo-calcaire, inerte, et une bentonite, sensible au processus d'agglomération. Des essais ont permis de caractériser l'impact de la concentration en sel et du cisaillement sur le diamètre des agrégats argileux et d'estimer quelle serait la taille de ces agrégats dans le dispositif de micro-irrigation où les cisaillements sont très importants. Ces solutions (eau+argiles) ont alimentées des rampes de dix goutteurs, et un suivi du débit des goutteurs a été effectué. Différentes conditions ont ainsi pu être testées telles que le temps de fonctionnement, la température, la salinité de la solution et la charge d'argile. En particulier, il a été mesuré une augmentation du débit selon la charge en bentonite. En revanche, et de manière contradictoire avec les observations initiales, Il est apparu en laboratoire que ces conditions hydrodynamiques et physico-chimiques ne sont pas les seuls paramètres qui influencent le colmatage des dispositifs de micro-irrigation et qu'il faille prendre en considération l'interaction de ces mécanismes avec un développement biologique particulièrement sensible à la température.

Mots clés : micro-irrigation, goutteurs, colmatage, agglomération, argiles, cisaillement

Abstract

This work concerns the experimental study the clogging mechanism in micro-irrigation. It combines two approaches: in situ experiments on an agricultural parcel which is irrigated by the waters of the Durance River followed with laboratory experiments. Initially, the in-situ study was devoted to capture the full complexity of the mechanism of clogging by integrating various climatic conditions, quality of irrigation water and varying topography. The emitters' flow rate was followed on four lines of 50 drippers, fed with filtered water to 80 μm and unfiltered. These data combined with the analysis of water and suspended matter help us to conclude that clogging is a physico-chemical phenomenon and that it is linked with the agglomeration of clay particles. In a second step, these findings have directed the implementation of protocols to study the impact of the agglomeration of clay particles on the clogging by controlling the physico-chemical properties of water. Two types of clays were chosen based on their reactivity: a mixture of clay and limestone, inert, a bentonite, a clay sensitive to the agglomeration process. Tests were used to characterize the impact of salt concentration and shear on the diameter of clay aggregates and to estimate what would be the size of these aggregates in micro-irrigation systems where shear is very important. These solutions (water clays) fed ramps of ten emitters. The emitter flow rate was assessed. Different conditions have thus been tested as operating time, temperature, salinity of the solution and the load of clay. It appears that the hydrodynamic conditions and physico-chemical properties are not the only parameters that influence the clogging of micro irrigation systems and that, in contrast with in-situ experiments it must be taken into account the interaction of these mechanisms with biological development.

Keywords: micro-irrigation, dripper, clogging, agglomeration, clay, shear