

# Master of Science HES-SO en Ingénierie du territoire

## TEST ET ADAPTATION D'UN BIOFILTRE POUR LE TRAITEMENT DES EAUX DE RUISSELLEMENT DE CHAUSSEE

Slijepcevic Ana

Sous la direction de  
Prof. Fabienne Favre Boivin  
Institut ITEC, Ecole d'ingénieurs de Fribourg

Expert externe : M. René Brodmann



**Mes remerciements vont à :**

Professeur Fabienne Favre Boivin, mon encadrante principale, pour la proposition du sujet, son soutien et son travail de coordination de ce projet à l'interface entre deux écoles et plusieurs disciplines.

Professeur Pascal Boivin, pour la mise à disposition des cassettes et des données hydrodynamiques caractéristiques des substrats, ainsi que pour l'introduction à la modélisation.

Professeur Jean-Marc Ribl, pour les informations et conseils liés aux aspects hydrologiques et hydrauliques et au dimensionnement du banc d'essai.

Professeur Richard Baltensperger pour son aide et ses conseils pour le traitement des données par Matlab.

Bruno Spahni, pour l'adaptation des caissettes et la construction du banc d'essai.

Karine Gondret et Frédéric Lamy pour la caractérisation du substrat en laboratoire et la végétalisation des cassettes.



## Table des matières

1	Résumé .....	1
2	Notations .....	1
2.1	Symboles .....	1
2.2	Abréviations .....	1
3	Introduction .....	2
3.1	Cadre du travail .....	2
3.2	Problématique des eaux de ruissellement des routes (revue bibliographique) .....	2
3.3	Recommandations et état de la technique.....	4
3.3.1	Divers systèmes disponibles.....	5
3.3.2	Particularité des biofiltres végétalisés .....	5
3.4	Critères d'efficacité .....	6
3.5	Méthodologies de test et de certification.....	7
4	Objectifs et hypothèses de travail.....	9
4.1	Focus et limites de l'étude.....	9
4.2	Description du système testé .....	10
4.2.1	Substrat.....	10
4.2.2	Configuration.....	10
4.3	Paramètres à évaluer.....	11
4.3.1	Détermination des conditions hydrologiques .....	11
4.3.2	Composition du substrat et conductivité hydraulique .....	11
4.3.3	Système de distribution et dynamique de saturation du substrat.....	11
4.3.4	Modélisation du comportement hydrologique et hydrodynamique.....	12
5	Matériel et méthodes .....	13
5.1	Description et montage du banc d'essai .....	13
5.1.1	La cuve de mesure de débits.....	13
5.1.2	La cassette .....	15
5.1.3	L'apport d'eau et l'écoulement.....	16
5.2	Données pluviométriques .....	16
5.3	Tests en laboratoire .....	17
5.3.1	Test d'écoulement .....	17
5.3.2	Systèmes de distribution.....	17

5.3.3	Humectation du substrat et mesure de potentiel hydrique.....	18
5.4	Modélisation des flux d'infiltration à l'aide de Hydrus 2D.....	18
5.4.1	Ajustement du modèle hydrodynamique grâce à la courbe caractéristique de rétention d'eau	18
5.5	Modélisation de la distribution de l'eau sur le système et des conditions hydriques par cassette .....	20
6	Résultats .....	24
6.1	Réactions du substrat et conductivité hydraulique .....	24
6.2	Evolution du bulbe d'humectation liée à la répartition du flux sur la cassette par mesure de potentiel hydrique.....	25
6.2.1	Modélisation de la répartition des flux d'infiltration par Hydrus 2D.....	25
6.2.2	Mesures de l'évolution du potentiel hydrique par suivi potentiométrique .....	28
6.2.3	Modélisation de la distribution de l'eau sur le système et des conditions hydriques sur les cassettes (conductivité et réserve en eau des cassettes) .....	31
7	Discussion .....	38
7.1	Réaction du substrat et conductivité hydraulique.....	38
7.1.1	Différences entre résultats en laboratoire et en cassette .....	38
7.1.2	Optimisation de la conception de la cassette .....	38
7.2	Dynamique d'humectation .....	38
7.2.1	Modélisation sur Hydrus 2D .....	38
7.2.2	Suivi potentiométrique de l'humectation et comparaison avec le modèle .....	39
7.3	Modélisation de la répartition de l'eau sur le système .....	39
8	Conclusions et perspectives.....	40
9	Références bibliographiques .....	42
10	Annexes .....	45
10.1	Annexe 1.....	45
10.2	Annexe 2.....	46
10.3	Annexe 3.....	47

# 1 Résumé

Un système de filtres végétalisés, permettant de traiter les eaux de ruissellement provenant des chaussées fortement polluées, est développé en collaboration entre les HES HEPIA et EIA FR. Les modules composant ce système sont des cassettes grillagées contenant un substrat composé de compost et de charbon végétal produit à partir de déchets verts. Les cassettes sont exposées en laboratoire aux conditions hydrologiques attendues sur le terrain. La conductivité hydraulique des modules et le comportement hydrodynamique du substrat sont testés. À partir de paramètres mesurés sur le substrat, des simulations sont effectuées sur un logiciel permettant des analyses de flux à travers de milieux poreux, pour déterminer l'évolution de la teneur en eau du substrat dans les conditions d'apport attendues. Des calculs de bilans hydriques journaliers sont effectués sur la base de conditions météorologiques annuelles moyennes, en tenant compte des valeurs de perméabilité initiales, des éléments d'information apportées par les simulations, et du colmatage du substrat par les matériaux transportés par l'eau. Ces résultats permettent d'obtenir une image de l'évolution de l'efficacité des filtres et des conditions auxquelles les végétaux seront exposés. En fonction de ces indications, il est possible d'adapter la conception et le dimensionnement des cassettes, ainsi que la végétation utilisée.

## 2 Notations

### 2.1 Symboles

$h$	hauteur [L] ou potentiel matriciel [mbar]
$K$	conductivité hydraulique [ $LT^{-1}$ ]
$K_s$	conductivité hydraulique à saturation [ $LT^{-1}$ ]
$n$	paramètre hydrodynamique de Mualem-van Genuchten [-]
$\alpha$	paramètre hydrodynamique de Mualem-van Genuchten [ $L^{-1}$ ]
$\theta$	teneur en eau volumique [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_s$	teneur en eau volumique à saturation [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_r$	teneur en eau volumique résiduelle [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_{cr}$	teneur en eau volumique au point de ressuyage gravitaire [ $L^3L^{-3}$ ]
$\theta_{pf}$	teneur en eau volumique au point de flétrissement [ $L^3L^{-3}$ ]

### 2.2 Abréviations

MES	Matière en suspension
DCO	Demande chimique en oxygène
DBO5	Demande biologique en oxygène (5 jours)
COD	Carbone organique dissous
PCB	Polychlorobiphényles
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques

## **3 Introduction**

### **3.1 Cadre du travail**

Ce travail s'insère dans le projet SMACC (Smart Clean City), initié en 2012 à la HES-SO, ayant entre autre pour objectif le développement de systèmes de traitement des eaux polluées urbaines innovants, efficaces, écologiques et durables, mais également apportant un avantage paysager et une amélioration du climat urbain.

Le projet est interdisciplinaire, plusieurs HES et groupes de recherche y sont associés (EIA Fribourg, HEPIA Genève, HEIG Vaud, HES Valais, ECAL Lausanne, Université de Zurich et l'entreprise Swissbiochar).

### **3.2 Problématique des eaux de ruissellement des routes (revue bibliographique)**

Dans la majorité des cas en Suisse, les eaux pluviales sont évacuées par des systèmes séparatifs, et directement déversées dans des eaux superficielles naturelles ou infiltrées dans le sol.

La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux, 1991, état 2013, Art 4.), définit les eaux polluées comme « *les eaux à évacuer qui sont de nature à contaminer l'eau dans laquelle elles sont déversées* ». L'ordonnance sur la protection des eaux (OEaux, 1998, état 2013, annexe 2) indique les teneurs-limites maximales de diverses substances polluantes tolérées dans les eaux superficielles et souterraines. Dans le cas de l'infiltration dans le sol, l'ordonnance sur la protection des sols (OSol, annexes 1, 2, 3) définit les teneurs limites en polluants qu'un sol propre à la culture ne doit pas dépasser.

Les eaux de ruissellement provenant des chaussées à fort trafic sont à l'époque actuelle fortement chargées en polluants, et leur infiltration ou déversement dans les eaux superficielles provoque dans la majorité des cas le dépassement des valeurs tolérées par la loi, et la mise en danger de la santé humaine et des écosystèmes : cette constatation se confirme par la dégradation continue des eaux superficielles en Suisse, malgré les traitements mis en place pour épurer les eaux usées urbaines.

Ainsi, les eaux pluviales s'écoulant sur les chaussées à fort trafic sont actuellement considérées comme polluées, et doivent de ce fait subir un traitement avant d'être infiltrées dans le sol ou déversées dans des milieux aquatiques naturels.

En Suisse, les eaux pluviales ne transitent généralement pas par une station d'épuration. Des systèmes de traitement décentralisés, sur mesure, adaptés au site et à l'état des eaux, doivent donc être mis en place pour assurer une dépollution suffisante permettant par la suite une infiltration dans le sol ou un rejet de ces eaux dans un milieu naturel, sans mettre en danger le fonctionnement écologique de ces milieux.

Les eaux pluviales ruisselant sur les voies de circulation automobile se chargent en polluants, qui proviennent des retombées atmosphériques, de l'usure de la chaussée, ou des véhicules. Des débris naturels, tels que des résidus de végétation, se retrouvent également dans ces eaux.

Ces polluants peuvent être répartis en quelques catégories distinctes :

- des polluants macroscopiques visibles, solides flottants d'origine naturelle ou synthétique : déchets en plastique, feuilles mortes...
- les matières en suspension (MES) : particules insolubles de petit diamètre, d'origine minérale ou organique, responsables de la turbidité de l'eau
- les matières oxydables (DCO, DBO5) : substances principalement à base de carbone organique pouvant être oxydées chimiquement et biologiquement, pouvant être sous forme particulaire ou dissoute (COD – carbone organique dissous)
- les nutriments inorganiques (azote (N), phosphore (P)) : composés permettant la croissance végétale, provenant de la décomposition organique, mais aussi de la pollution anthropogène (combustibles, produits de nettoyage ou de dégivrage, agriculture)
- les éléments-traces métalliques (principalement Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Zinc (Zn), Plomb (Pb)) : proviennent de l'usure des freins et des pneus, du carburant, des lubrifiants, des structures métalliques associées à la route
- les micro-polluants organiques (hydrocarbures, composés aromatiques, polychlorobiphényles, pesticides, ...) : proviennent des résidus et fuites de carburants, de revêtements routiers, des traitements d'entretien
- les micro-organismes (pollution bactériologique) : associée à la décomposition de matière organique.

Parmi ces groupes de polluants, les éléments-traces métalliques, principalement le cadmium et le plomb sont systématiquement présents dans les eaux de ruissellement de routes. Même à une très faible dose, ils possèdent une toxicité avérée sur les organismes vivants, y compris l'humain : l'éventail de leurs effets toxiques est très large, touchant principalement le système nerveux, les reins et le foie. Ils sont aussi cancérigènes et mutagènes. N'étant pas biodégradables, ils s'accumulent dans le milieu naturel (sol, sédiments), dans les tissus vivants, et au sein des chaînes alimentaires.

Certains micropolluants organiques synthétiques (PCBs, additifs de l'essence, pesticides) possèdent les mêmes propriétés et sont donc tout aussi dangereux.

Les substances organiques biodégradables et les nutriments minéraux posent un problème s'ils se retrouvent en concentration importante dans des milieux aquatiques naturels : ils stimulent la croissance bactérienne et végétale, pouvant déséquilibrer les écosystèmes (eutrophisation).

<i>Polluant</i>	<i>Teneur dans les eaux de ruissellement de chaussée [mg/l]</i>	<i>Limite admise pour les eaux de surface [mg/l]</i>
COD		1-4
N-ammonium		0.2-0.4
N-nitrate		5.6
Cadmium		0.0002
Plomb	0.0023-0.270	0.01
Zinc	0.066-1,7	0.02
Cuivre	0.011-0.150	0.0005
HAP	0.00016-0.02	0.0001
Herbicides		0.0001 ( <i>pour chaque substance</i> )

*Polluants dans les eaux de ruissellement de chaussée*

Source : OEaux, annexe 2

Les teneurs en polluants varient selon le bassin versant (charge et type de trafic, climat, type de revêtement...), et pour un même bassin versant selon la saison, l'intensité, la durée et la période précédant un événement pluvieux, mais aussi au cours d'un événement pluvieux donné.

Une information importante, confirmée par de nombreuses recherches (Brown et al. 2012, Chebbo 2011, Bertrand-Krajewski 2006), consiste en le fait que la majorité de ces polluants est fixée à des particules en suspension, particules fines de diamètre généralement inférieur à 100 micromètres.

<i>Carbone organique</i>	<i>Azote total</i>	<i>Hydrocarbures totaux</i>	<i>Plomb</i>
77-95	48-82	82-99	80-100

*Polluants fixés sur les particules solides (en % de la pollution totale)*

*Source : Gestion et traitement des eaux pluviales, Jean-Yves Viau*

Selon Chebbo et Bachoc (1995), 66 à 85% de la fraction massique des MES est inférieure à 100 µm, le diamètre médian étant compris entre 25 et 44 µm.

Il est donc possible d'associer la pollution totale de l'eau pluviale à un paramètre facilement mesurable, qui est la teneur en matières en suspension.

<i>MES</i>	<i>Masses annuelles (masse solide totale pour volume ruisselé total) [mg/l]</i>	<i>Masses maximales par évènement [mg/l]</i>
160-460		645-3800

*Gammes de teneurs en matières en suspension dans les rejets pluviaux séparatifs*

*Source : Gestion et traitement des eaux pluviales, Jean-Yves Viau*

Cette particularité indique que des techniques de séparation de particules, telles que la décantation ou la filtration, permettront d'éliminer une bonne partie, jusqu'à environ 80%, des polluants présents dans les eaux de ruissellement de chaussée (Bertrand-Krajewski 2006).

### 3.3 Recommandations et état de la technique

Selon les instructions de l'Office fédéral de l'environnement (Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication, OFEV, 2002), *l'évacuation des eaux des voies de communication doit garantir la sécurité et le confort pour les usagers de la route, tout en remplissant simultanément les différentes exigences relatives à l'environnement. Il s'agit en particulier de boucler le cycle de l'eau de la manière la plus naturelle possible sans que les eaux soient polluées.*

Pour satisfaire à ces instructions, il est dans certaines situations nécessaire de mettre en place des installations devant assurer :

- Une efficacité hydraulique suffisante pour ne pas gêner l'évacuation des eaux
- Une capacité d'épuration suffisante pour éviter la pollution du milieu naturel
- Une capacité de rétention permettant d'améliorer l'efficacité de l'épuration et de permettre l'écrêtage des débits forts dans le but d'éviter un choc pollutif et de conserver la dynamique hydrologique du milieu récepteur.

D'autres paramètres importants sont le coût d'installation et d'entretien, la robustesse, la facilité d'accès pour l'entretien et le suivi des performances, l'intégration paysagère. L'écobilan de l'installation peut aussi être pris en compte.

Etant donné la variabilité des paramètres liés à la pollution des eaux, aux infrastructures présentes et à la sensibilité des milieux naturels, il est nécessaire d'adapter la solution à la situation envisagée.

D'un point de vue de l'occupation spatiale, souvent condition critique dans le choix d'un système, il existe d'une part les bassins d'infiltration, pouvant occuper une surface importante et disposer d'un volume de stockage élevé, et d'autre part des éléments modulaires, d'un volume plus petit, présentant

un rapport surface de ruissellement/surface de traitement élevé (Daly et al. 2012) et un volume de stockage faible, mais plus facilement adaptés à un espace limité.

Les bassins ont l'avantage d'un écrêtage très efficace d'évènements intenses, et s'ils possèdent un substrat filtrant adapté ainsi qu'une activité biologique, l'eau y est épurée suffisamment, pouvant par la suite, soit être directement infiltrée dans le sous-sol ou évacuée par drainage vers un milieu naturel. Cette infiltration reste encore soumise à certaines conditions, comme la vulnérabilité et l'exploitation des eaux souterraines (VSA 2002). Ce type de traitement est en particulier utilisé pour les eaux de ruissellement urbaines.

Toutefois, dans le cas des écoulements routiers, les eaux étant fortement polluées et l'espace dédié aux infrastructures étant linéaire et limité en largeur, des éléments modulaires « ponctuels » répartis le long du tracé de la route s'avèrent souvent mieux adaptés.

### **3.3.1 Divers systèmes disponibles**

Les différents systèmes actuellement utilisés peuvent être classés en quelques groupes (OFROU 2010):

- Les décanteurs : éliminent les particules les plus grossières, et jusqu'à 30% des MES
- Les séparateurs lamellaires : éliminent jusqu'à 50% des MES (peuvent être associés à des déshuileurs)
- Les filtres à tissu pelucheux et les microtamis : permettent d'éliminer jusqu'à 80% des MES, mais pas les particules les plus petites, portant encore une grande quantité de métaux lourds
- Le filtre à gravier: bonne rétention des MES, mais toujours une rétention des métaux lourds peu efficace.
- Le filtre à sable : si associé à une couche de matériau adsorbant, retiennent jusqu'à 90% des MES et des métaux lourds.
- Les filtres végétalisés : même performance que le filtre à sable pour les MES, avec en plus une capacité de rétention des nutriments minéraux et du carbone organique dissous ; les végétaux peuvent absorber l'azote et le phosphore, et s'il existe une activité microbienne dans le substrat, la biodégradation d'une partie des composés carbonés est possible.

### **3.3.2 Particularité des biofiltres végétalisés**

*Pour traiter les eaux des voies de communication, il faut en général faire appel à des installations aussi naturelles que possible, dont l'effet d'épuration et de rétention repose principalement sur l'écoulement à travers une couche de terre. Cette dernière installation est la mieux adaptée à l'élimination des petites particules très polluantes. (Instructions de l'OFEV (2002) : Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication)*

Les performances épuratives des substrats analogues au sol proviennent des caractéristiques suivantes :

- La finesse de la texture assure une bonne capacité de rétention des particules de faible diamètre
- Les interactions chimiques avec les composants du substrat (substances humiques et argileuses) permettent une adsorption des polluants en solution (métaux lourds, composés azotés et phosphore, composés organiques)

En cas de présence de végétaux et d'activité biologique, l'activité microbienne, végétale et éventuellement animale (invertébrés du sol) permet d'un part l'assimilation des nutriments et la dégradation de composés organiques, et d'autre part le freinage du phénomène de colmatage par

l'activité des racines et des invertébrés, par exemple des vers de terre (Davis et al. 2001, Read et al. 2008). Ces caractéristiques assurent une sorte d'auto-nettoyage et prolongent la durée de vie de l'installation.

Des systèmes avec substrat végétalisé, appelés aussi biofiltres ou systèmes à biorétention, ont été largement appliqués ces dernières années en tant que technologie de gestion des eaux de ruissellement urbaines. Il s'agit d'un outil parmi d'autres développés avec l'objectif de réduire l'impact de l'urbanisation sur les ressources en eau. Des rapports sur les expériences sur le terrain ne sont pas nombreux, proviennent principalement des Etats-Unis, d'Australie et d'Allemagne et portent surtout sur des structures de type bassins de rétention.

De ce fait, il persiste encore de nombreuses questions sur la durabilité et la performance à long terme de ces systèmes.

### **3.4 Critères d'efficacité**

Les critères d'efficacité d'un biofiltre sont basés sur ses capacités hydrauliques et dépollutives. Pour évaluer l'efficacité dépollutive, les concentrations en matières en suspension, de cuivre et de zinc (éléments traces métalliques servant d'indicateurs), ainsi que le carbone organique dissous sont mesurées à la sortie du système, et en comparant avec les concentrations en entrée, l'abattement total est obtenu.

La capacité hydraulique est caractérisée par la quantité d'eau pouvant traverser le substrat par unité de temps et de surface (débit spécifique [ $l/m^2/min$ ]).

La performance d'un biofiltre est en premier lieu liée au substrat utilisé, qui en tant que support de croissance végétale est en général analogue à un sol (il est possible de parler de sol reconstitué ou « technosol »).

Paramètre essentiel pour la performance hydraulique, la conductivité hydraulique d'un tel substrat est liée à sa texture (composition granulométrique) et à sa structure (distribution et mode d'assemblage des particules), qui conditionnent la taille et l'interconnexion des pores à travers lesquels l'eau peut circuler.

Le substrat doit assurer un drainage relativement rapide pour un rendement hydraulique acceptable, mais également un temps de contact suffisant pour permettre l'interaction des polluants avec le substrat et la végétation, permettant leur rétention et leur dégradation. Un optimum doit donc être atteint pour ces deux paramètres.

La charge superficielle spécifique [ $m^3/m^2$ ] indique quelle surface de ruissellement est traitée par unité de surface de traitement. Plus elle est élevée, plus les débits à traiter sont élevés, et plus grande est la charge de polluants déposée par unité de surface de filtration.

D'autres paramètres, tels que la hauteur des ouvrages, le niveau de pression hydrostatique requis, le coût et la sécurité de la construction et de l'entretien, l'espace occupé, la durée d'utilisation et la facilité d'élimination entrent aussi en compte.

Les recommandations concernant ces paramètres varient selon les pays. En Suisse, une classification, comprenant 5 classes de performance, a été établie par l'Office fédéral des Routes sur la base de critères hydrauliques et dépollutifs. Elle s'applique aux routes nationales et principales.

Classe d'efficacité	Capacité hydrau- lique	Charge superficielle spécifique	Concentrations					Degré d'efficacité		
	[l/m <sup>2</sup> /min]	[m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	MES <sup>1)</sup> [mg/l]	Zn <sup>2)</sup> [µg/l]	Cu <sup>2)</sup> [µg/l]	HAP <sup>3)</sup> [µg/l]	COD <sup>4)</sup> [mg/l]	MES [%]	Zn [%]	Cu [%]
5	>8	>400	<10	<5	<10	<0.1	<4	>90	>90	>90
4	4	200	20	10	20	0.2	6	80	80	80
3	2	100	30	15	30	0.3	8	70	70	70
2	1	50	40	20	40	0.4	10	60	60	60
1	<1	<50	>40	>20	>40	>0.4	>10	<60	<60	<60

1) *Matières en suspension* ; 2) *teneurs totales*; 3) *hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)* ; 4) *Carbone organique dissous*

Classification de la capacité hydraulique et de la rétention des polluants (5 = meilleure note, 1 la moins bonne). Source : OFROU 2010.

Les recommandations de l'OFROU ne concernent toutefois que les autoroutes et les axes routiers gérés par cet organisme. Pour les autres routes, il n'existe pas d'instructions particulières.

Il est important de préciser que les performances hydrauliques et dépollutives des biofiltres vont évoluer au cours du temps de leur utilisation. Des quantités importantes de matériaux sont déposées et incorporées au substrat, ce qui va provoquer un certain colmatage et une diminution de la perméabilité au cours du temps (Le Coustumer et al. 2012). Les capacités épuratives vont évoluer aussi. L'activité biologique (racines, vers de terre, protozoaires, bactéries) va aussi influencer les caractéristiques du substrat : une certaine redistribution des sédiments par des organismes peut ralentir le colmatage. Cette évolution peut en partie être prévue par des tests en laboratoire, mais l'essentiel des constatations est fait par des essais en conditions réelles.

De plus, les systèmes de type biofiltre végétalisé comportent d'autres contraintes qui influencent leur efficacité et déterminent les nécessités d'entretien: il s'agit des paramètres conditionnant la survie des végétaux. Pour chaque nouvelle installation, il est nécessaire de prévoir, en fonction des paramètres spatiaux et climatiques, les conditions dans lesquelles les végétaux vont se développer (quantités et fréquences d'apport d'eau, exposition à l'évaporation, température, luminosité, charge de sédiments et polluants...) Tous ces paramètres doivent être si possible pris en compte lors du choix de la configuration du système et des végétaux implantés, de manière analogue à la démarche de conception de toits végétalisés (Berthier 2010).

### 3.5 Méthodologies de test et de certification

Sans être contraignants, de nombreuses normes et recommandations indiquent que tout nouveau système de traitement devrait subir des tests d'efficacité, permettant d'évaluer ses performances hydrauliques et de rétention de polluants, de connaître ses possibilités d'application ainsi que de déterminer les bases de dimensionnement.

Un suivi des performances au cours de l'utilisation du système doit aussi être assuré.

En matière de techniques de test, les recommandations suisses, américaines et allemandes ont été comparées et utilisées dans ce travail (OFEV/OFROU (2010), TAPE (2011), DWA (2011)).

La méthode la plus couramment utilisée pour tester les performances hydrauliques consiste à exposer le système à plusieurs débits, en général 10, en partant d'un débit minimal (en général 1/10 du débit maximal que le système peut accueillir), jusqu'au débit maximal, avec l'objectif de mettre en lien les

conditions d'écoulement en entrée, les conditions d'écoulement à travers le système et les capacités dépollutives.

Etant donné que la majorité des polluants est liée aux particules (MES), les performances de rétention de polluants sont testées en injectant un mélange de particules, généralement en quartz, ou de sédiments routiers réels. Une courbe de percée effectuée sur le substrat en laboratoire peut déjà donner une indication sur la capacité du substrat à retenir des particules d'un diamètre donné.

La vitesse de colmatage est testée en appliquant en continu une charge de particules jusqu'à atteindre la masse annuelle théoriquement attendue (test long et à priori peu représentatif de la réalité).

Un autre moyen d'anticiper l'évolution de l'efficacité des systèmes est la modélisation (Daly et al. 2012, Akan et al. 2013). Il est possible d'obtenir des informations relativement fiables sur les conditions météorologiques et les propriétés du substrat, mais en ce qui concerne la variation de la composition et de la concentration des polluants, ainsi que de l'activité biologique, il s'agit de phénomènes dynamiques difficilement prévisibles et descriptibles de façon déterministe.

## 4 Objectifs et hypothèses de travail

Le système testé dans cette étude fait partie du groupe des biofiltres végétalisés. Le substrat utilisé a été optimisé d'un point de vue épuratif, hydrologique et comme support de croissance végétale. Il devrait donc répondre aux attentes mises en avant précédemment, c'est-à-dire associer une bonne rétention des matières en suspension et dissoutes, pour un rendement hydraulique acceptable. Il est aussi attendu de rencontrer certains problèmes propres à ce type de systèmes, comme le colmatage et la sensibilité de la végétation aux périodes sèches.

### 4.1 Focus et limites de l'étude

L'étude porte sur un système de traitement modulaire, composé d'une chaîne de caissettes contenant un substrat traitant : il s'agit d'un mélange de compost et de *biochar* (matériau produit par pyrolyse de déchets végétaux) végétalisé. Un prototype-test du système sera installé sur le terrain au printemps 2014, dans le but de suivre et évaluer son fonctionnement en conditions réelles. Le substrat et la configuration de base des cassettes ont été développée à Hepia, par professeur Pascal Boivin et son équipe. La configuration du système complet ainsi que l'installation et le suivi sur de terrain du prototype-test sont conduits par professeur Fabienne Favre Boivin à l'Ecole d'ingénieurs de Fribourg. Il est prévu de l'installer au niveau du pont de Pérolles, le long de la route de Marly (route cantonale) à Fribourg.

Suite à cette expérience, le système sera optimisé dans le but d'être appliqué à une échelle plus large.

Ce travail se focalise sur les aspects de dimensionnement et de conception du système, avant tout sous l'aspect hydraulique et hydrodynamique. L'aspect de dépollution à proprement dit sera testé dans la suite du projet, à travers le suivi des performances du système installé en conditions réelles.

Les caractéristiques hydrodynamiques du substrat ont été étudiées à Hepia, et la courbe caractéristique  $h(\theta)$  décrivant l'évolution du potentiel hydrique en fonction du taux d'humidité, ainsi que la conductivité hydrique à saturation ( $K_s$ ), sont disponibles.

Il s'agit de vérifier si le système de cassettes-biofiltres contenant le mélange de compost et de biochar développé à l'Hepia est utilisable pour le traitement des eaux de ruissellement de chaussée dans la configuration météorologique et géométrique prévue sur le terrain.

Deux aspects principaux doivent être étudiés :

- Le comportement des modules (ensemble cassette-substrat-végétation) face à la charge hydraulique et sédimentaire caractéristique du bassin versant à traiter, qui va conditionner le nombre de cassettes à installer et la configuration de l'installation.
- Les conditions hydrologiques auxquelles le substrat sera exposé et qui vont conditionner la survie des végétaux et l'activité biologique du substrat en général.

L'objectif de ce travail consiste en deux parties. La première consiste à réaliser une première batterie de tests en laboratoire sur des modules unitaires, dans le but d'évaluer plus précisément les points suivants :

- 1) Tester la dynamique d'écoulement à travers la cuve de mesure de débit et comparer les hauteurs d'eau aux calculs prévisionnels du déversoir pour des débits attendus.
- 2) Vérifier la stabilité du substrat (sensibilité à l'érosion, l'écrasement, l'affouillement) et la présence d'écoulements préférentiels.

- 3) Déterminer la hauteur d'eau pour différents débits et le débit à partir duquel la cassette déborde (hauteur d'eau maximale fixée à 10 cm)
- 4) Déterminer la conductivité hydraulique du substrat, déjà testée sur colonne en conditions de saturation ( $K_s$ ), en conditions d'application et aux dimensions réelles.
- 5) Tester la dynamique d'humectation du substrat (évolution du bulbe d'humectation, temps de saturation), liée à la répartition du flux sur la cassette.

La deuxième partie du travail consiste à estimer par la modélisation l'évolution du fonctionnement du système d'un point de vue hydrologique et définir les scénarii hydrologiques et météorologiques critiques en conditions d'utilisation réelles pour l'efficacité et la pérennité des systèmes végétalisés. Il s'agira de tester, sur la base de données hydrodynamiques existantes sur le substrat, la répartition de l'eau à travers une cassette à différents débits à l'aide du logiciel Hydrus. Ensuite, grâce aux informations disponibles, un calcul des bilans hydriques prévisionnels sur la totalité du système au cours d'une année de fonctionnement est effectué.

## **4.2 Description du système testé**

### **4.2.1 Substrat**

Le substrat utilisé dans les biofiltres joue un rôle clé pour leur efficacité. Dans le cadre de ce projet, le substrat utilisé est un mélange de compost et de biochar. Le compost est à base d'un mélange de fumier de vache, de poule et de cheval mélangé à de la paille, de la terre et de la poudre de roche. Le biochar, matériau analogue au charbon de bois, est produit par la pyrolyse, transformation à haute température (400-700 °C) en absence d'oxygène, de déchets végétaux. La caractéristique de ce matériau est sa grande porosité et sa capacité d'adsorption, efficace en particulier pour des composés organiques apolaires (hydrocarbures, HAP, pesticides...), mais aussi dans une certaine mesure pour des métaux lourds et les composés azotés (Sohi et al. 2010). Alors que le compost apporte les nutriments et les composés humiques, le biochar apporte à la fois la perméabilité et les capacités épuratives supplémentaires. Deux teneurs en biochar, 30% et 50%., considérées comme optimales d'un point de vue hydraulique et épuratif, sont testées dans ce travail.

### **4.2.2 Configuration**

#### *4.2.2.1 Module*

Le substrat est placé dans des cassettes en acier inoxydable, aux parois grillagées, à travers lesquelles les végétaux sont plantés. La surface supérieure est libre et exposée à l'apport d'eau de ruissellement : l'eau traverse le substrat et est drainée par le bas de la cassette dans une conduite qui aboutit à l'exutoire (cours d'eau naturel).

#### *4.2.2.2 Installation future sur le terrain*

L'installation est prévue pour traiter l'eau pluviale provenant d'un bassin versant correspondant à 300 m<sup>2</sup> de surface de chaussée. Actuellement, l'eau s'écoule dans la Sarine après avoir traversé une chambre de décantation. L'eau sera déviée par un by-pass installé dans la chambre vers l'installation de traitement.

Il est prévu que dix modules soient installés en série (maximum suivant l'espace disponible, à priori 10), de sorte à ce que l'eau débordant de la première cassette s'écoule sur la suivante. Avant la première cassette, l'eau traversera une cuve équipée d'instruments de mesure en temps réel de débit et de turbidité, ainsi que d'un système de prélèvement automatique d'échantillons. À la sortie du

système, l'eau drainée par les cassettes traversera une cuve identique, ce qui permettra d'évaluer l'efficacité épuratoire du système au cours du temps et en fonction des événements météorologiques.

Le nombre de modules dépend des volumes d'eau qu'il est nécessaire de traiter. La configuration de l'installation peut être adaptée au site : dans l'essai sur le terrain, il est prévu que les cassettes s'enchaînent linéairement, parallèlement à la route, en suivant la pente du terrain. Il est assumé que, lors des événements de très forte intensité et de fréquence faible (précisé dans la partie 5.2), une partie de l'eau ne sera pas filtrée et aboutit à l'exutoire en débordant de la dernière cassette.

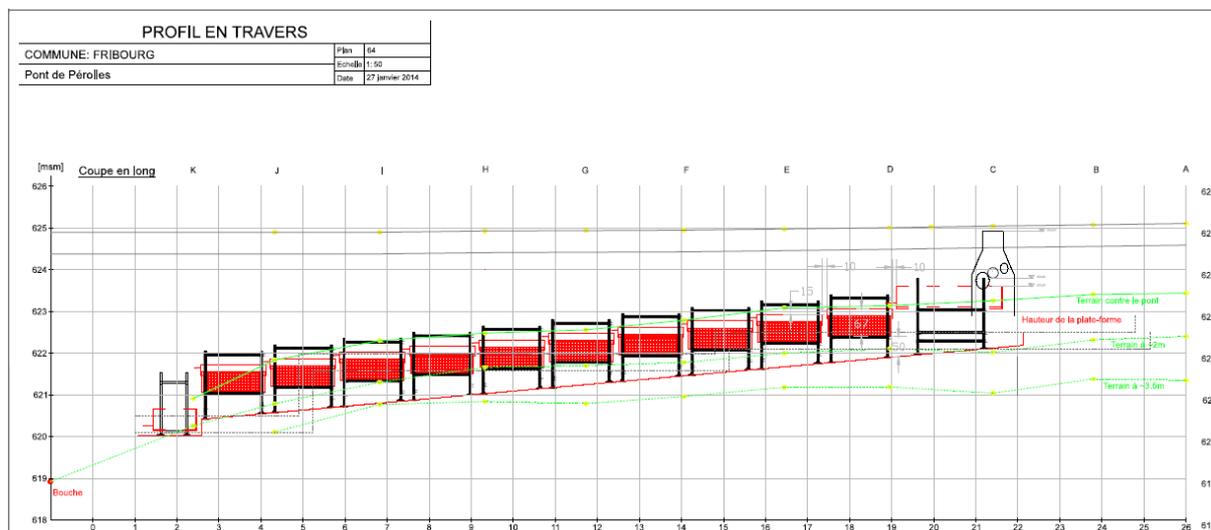


Figure 1 : Plan de l'installation sur le terrain (fourni par B. Spahni)

## 4.3 Paramètres à évaluer

### 4.3.1 Détermination des conditions hydrologiques

Une analyse des conditions météorologiques régionales et du bassin versant va permettre de connaître les débits maximaux auxquels l'installation sera exposée, mais aussi la fréquence et la quantité de pluie reçue, ainsi que la quantité approximative de matières en suspension apportées. Ces informations seront utiles pour le dimensionnement de l'installation (nombre de cassettes et/ou leur taille) et pour le choix d'une végétation adaptée.

### 4.3.2 Composition du substrat et conductivité hydraulique

Les débits maximaux à traiter et la perméabilité du substrat détermineront le nombre de cassettes à installer sur le terrain. Lors de la constitution du substrat, deux variantes optimales pour le rendement épuratif, la conductivité hydraulique et la croissance végétale ont été retenues : le premier substrat contient 30% de biochar, le deuxième 50%. La conductivité hydraulique à saturation a été mesurée sur colonne pour les deux substrats. Le test sur les cassettes permettra de connaître le comportement hydrique des deux substrats en conditions d'application, exposés à plusieurs débits reflétant les conditions de terrain, et de confronter ces résultats à des modèles prévisionnels.

### 4.3.3 Système de distribution et dynamique de saturation du substrat

Dans le but d'éviter l'affouillement, optimiser l'épuration, et assurer un apport régulier d'eau à toutes les plantes, le flux d'eau devrait être distribué aussi uniformément que possible sur la surface du substrat. Une configuration est conçue, testée et comparée à une distribution ponctuelle. La répartition de l'eau à travers le substrat (bulbe d'humectation) est suivie par des capteurs tensiométriques.

#### **4.3.4 Modélisation du comportement hydrologique et hydrodynamique**

A partir des données pluviométriques et de perméabilité du substrat, des prévisions sont faites par rapport à la distribution des flux sur plusieurs cassettes.

Pour différents flux d'entrée, la dynamique hydrique, en particulier la distribution de l'eau et la vitesse de saturation, sont simulés à l'aide du logiciel Hydrus (2D), logiciel de simulation d'écoulements en milieux poreux à taux de saturation variable (Simunek 2011). Les paramètres de la relation entre le potentiel hydrique et la teneur en eau volumique (courbe  $h(\theta)$ ) sont utilisés pour le calage du modèle. Les résultats de ces simulations sur une cassette seront confrontés aux mesures réalisées, et permettront d'évaluer l'exactitude du modèle proposé pour la distribution de l'eau sur tout le système.

Pour estimer les bilans hydriques des cassettes au cours de l'année, un premier modèle est basé sur la simple conductivité hydraulique sans prendre en compte l'accumulation des sédiments.

Un deuxième modèle, plus réaliste, prend en compte le colmatage du substrat au cours du temps de fonctionnement de la cassette.

En fonction de ces résultats et de la statistique météorologique, il sera possible de prévoir les conditions hydriques auxquelles chaque cassette du système sera a priori exposée.

## 5 Matériel et méthodes

### 5.1 Description et montage du banc d'essai

#### 5.1.1 La cuve de mesure de débits

Pour le test en laboratoire, elle est construite avec le bois de panneaux de coffrage (plan en annexe 1). Elle est dimensionnée pour pouvoir accueillir les débits maximaux prévus, correspondant à une fréquence bisannuelle (OFROU 2013), dans notre cas, 4 l/s :

Selon la norme VSS 640350 :

Temps de retour :  $T = 0.5 \text{ ans}$

Zone Mittelland :

Facteurs hydrologiques :  $a = 17.14$ ,  $b = 0.2$

Temps de concentration :  $t_o = 8 \text{ min}$

Débit spécifique  $q_{0.5} = 52 \text{ mm/h} = 144 \text{ l/s*ha} = 0.0144 \text{ l/s*m}^2$

Coefficient de ruissellement :  $0.9$

Surface réduite de chaussée/cassette :  $A_{red} = 25*12*0.9 = 270 \text{ m}^2/\text{cassette}$

Débit de projet (pour une grille au pont de Pérolles) :  $Q_{0.5} = A_{red} * q_{0.5} = 3.9 \text{ l/s*cassette}$

Les débits extrêmes doivent être court-circuités au niveau de la chambre de collecte et directement acheminés au cours d'eau récepteur.

Un premier compartiment sert à recueillir l'écoulement à partir de la chambre : il est muni d'une paroi plongeante permettant de retenir les éventuels flottants et diminuer les turbulences. Un plateau de sédimentation est construit dans le canal, dans le but d'obtenir une étape de dessablage, d'élimination des particules minérales de granulométrie supérieure à 200  $\mu\text{m}$ , ne comportant pas des grandes quantités de polluants mais risquant de former un dépôt sur le substrat et d'en altérer le fonctionnement. La longueur de 1 m a été considérée convenable pour assurer une sédimentation des particules d'un diamètre au-delà de 200 microns (Degrémont 2005). Pour les essais sur le terrain, il est prévu de placer, à l'extrémité du plateau, un barrage retenant les sédiments : ce point doit encore être déterminé, en particulier par rapport à l'entretien (retrait des sédiments). Suite au passage sur le plateau, l'eau passe dans une chambre équipée d'un turbidimètre et d'une pointe limnimétrique (sur le terrain, elle sera équipée d'une sonde de hauteur d'eau à ultrason pour un suivi en ligne), et s'écoule par un déversoir en V permettant une relation univoque entre le débit et la hauteur d'eau. Dix centimètres plus bas, l'eau aboutit sur un déversoir de type languette de la largeur de la cassette (25 cm) et se déverse en tête de la première cassette.

<i>Canal d'écoulement</i>	<i>Longueur [m]</i>	<i>Largeur [m]</i>	<i>Hauteur [m]</i>
	2.5	0.25	0.5
<i>Plateau de sédimentation</i>	<i>Longueur [m]</i>	<i>Hauteur dans le canal [m]</i>	
	1	0.2	
<i>Déversoir triangulaire</i>	<i>H [m]</i>	<i>L [m]</i>	<i><math>\alpha</math> [°]</i>
	0.17	0.14	45

Selon la formule de Gourley (Degrémont 2005) :

$$\alpha = 45^\circ :$$

$$Q = 0.55 * h^{2.47}$$

Si le débit maximal de dimensionnement est appliqué (4 l/s, donc 0.004 m<sup>3</sup>/s), l'eau atteindrait une hauteur de 14 cm. Pour une marge de sécurité, l'échancrure mesure 17 cm.

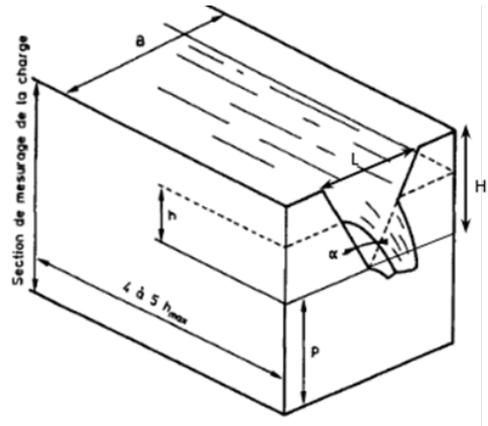


Figure 2 : Dimensions du déversoir en V



Figure 3 : Cuve de mesure

### 5.1.2 La cassette

Le prototype mesure 150 x 50 x 25 cm (longueur/hauteur/largeur), et est construit en tôle zinguée, d'une épaisseur de 2 mm (plan en annexe 2). La surface supérieure est ouverte, les parois larges et le fond sont constituées d'un grillage (cellules carrées d'environ 4 cm de côté), les parois étroites sont fermées. L'intérieur est tapissé d'un géotextile de type voile de forçage pour éviter la perte du substrat. Le fond est recouvert d'une couche de 2 cm de billes en argile. Lors du remplissage du substrat, les végétaux sont introduits par couches successives, en assurant une distance suffisante entre elles pour donner l'espace aux racines (environ 30 plantes par face latérale large). Le haut de la cassette restera libre, car il y aura déposition de sédiments.

Les cassettes testées en laboratoire ont été équipées de *Stipa tenuifolia*, graminée vivace résistante à la sécheresse, aux racines abondantes. En effet, il est supposé que le substrat, exposé à l'évaporation sur plusieurs surfaces, sera souvent relativement sec.

Des lampes horticoles de 600 W sont placées au-dessus (à environ 1,5 m) des cassettes : des déclencheurs automatiques sont réglés pour une photopériode de 14h dans le but de stimuler le redémarrage de la croissance.

Sur les cassettes, une couronne de planches est fixée autour du bord supérieur de la cassette, et l'étanchéité est assurée, de sorte à permettre une mise sous charge de 10 cm maximum. Cette hauteur a été choisie dans le but d'assurer un écoulement stable et éviter le débordement latéral (hauteur des parois 20 cm) pour le débit maximal (4 l/s) lors du scénario où la cassette serait totalement colmatée, donc où l'eau atteindrait une hauteur d'environ 14 cm. Au-delà de cette hauteur, l'eau s'écoule sur la cassette suivante par un déversoir fixé à l'extrémité de la cassette.



Figure 4 : Cassette avec pourtour en bois

### 5.1.3 L'apport d'eau et l'écoulement

Les débits auxquels le système sera le plus souvent exposé étant relativement faibles (entre 0.1 et 0.5 l/s), un arrosoir est suffisant pour les simuler en laboratoire. Le niveau d'ouverture de la vanne a été calibré et marqué en fonction des débits fournis, qui ont été mesurés par remplissage de récipients gradués et testés dans la cuve de mesure. Les flux percolant et débordant de la cassette sont récoltés dans un canal fabriqué à partir d'un tuyau PVC coupé longitudinalement en deux.

Pour tester les débits élevés, une pompe est disponible, mais peu précise aux débits inférieurs à 5 l/s.

## 5.2 Données pluviométriques

Les données météorologiques utilisées sont obtenues du service météorologique de la ville de Fribourg portent sur 20 années, de 1993 à 2012. Il s'agit de mesures d'intensités pluvieuses en mm/10 min.

Les fichiers sont sous forme Excel, et ils sont traités par Matlab de sorte à obtenir des données annuelles continues.

Année	1993-2013
<i>I minimale [mm/10min]</i>	0.03
<i>I 0.25-quantile [mm/10min]</i>	0.2
<i>I moyenne [mm/10min]</i>	0.3653
<i>I médiane [mm/10min]</i>	0.2
<i>I 0.75-quantile [mm/10min]</i>	0.4
<i>I 0.9-quantile [mm/10min]</i>	0.6
<i>I maximale [mm/10min]</i>	17.6

Figure 5 : Statistiques pluviométriques générales

Pour chaque année, à partir d'une courbe indiquant le volume de pluie en fonction de l'intensité, il est possible de déterminer en-dessous de quelle intensité-limite tombe 90% du volume total. Cette analyse est faite pour les 20 années suivies, et l'intensité en dessous de laquelle tombe 90% du volume en moyenne sur les 20 ans est retenue pour calculer le débit maximal qui doit être traité. Pour les débits supérieurs, il est donc assumé que l'installation ne pourra pas traiter la totalité de l'eau ruisselée : une partie de l'eau s'écoulera par trop-plein de la dernière cassette directement dans le cours d'eau récepteur.

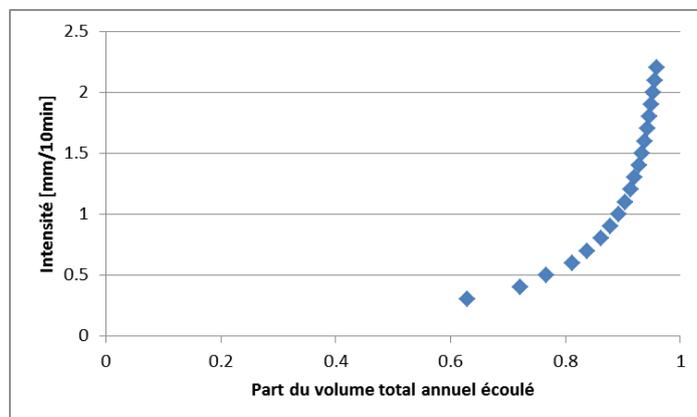


Figure 6 : Le volume sous la courbe décrit la proportion du volume total annuel écoulé en-dessous d'un débit donné

Selon cette estimation, il suffirait que le système soit capable de filtrer un débit correspondant à une intensité de pluie de 1.1 mm/10 min, correspondant à un débit d'entrée de 0.5 l/s.

La hauteur de pluie annuelle moyenne sur les 20 années traitées correspond à 1006 mm/an.

## 5.3 Tests en laboratoire

### 5.3.1 Test d'écoulement

Il est prévu de tester une gamme de débits, du plus faible au plus fort que l'on peut atteindre dans les conditions météorologiques régionales, en les acheminant par le système cuve + une cassette.

Déroulement des tests :

- 1) La cuve de mesure est calibrée en indiquant la hauteur d'eau correspondant aux débits donnés : les valeurs calculées par la formule du déversoir sont comparées aux valeurs mesurées.
- 2) Suite à l'écoulement d'eau sur la cassette, même si un grand soin a été apporté au remplissage de la cassette et au montage du système de mise en charge, il est vérifié s'il existe des écoulements préférentiels visibles (écoulement le long de la structure métallique, non-étanchéité de la couronne de mise en charge) ; il est aussi vérifié s'il l'effet d'affouillement ou de perte de substrat est important.
- 3) Pour les deux substrats testés (30% et 50% de biochar), la conductivité hydrique réelle de la cassette est estimée et comparée avec les mesures de la conductivité à saturation sur colonne (infiltromètre à double anneau, saturation du substrat pendant 24h, mesure effectuée à Hepia). Il est cherché d'atteindre le débit pour lequel la hauteur d'eau se stabilise (hauteur stable pendant 30 min) aux environs de 10 cm (niveau de débordement), et la conductivité est calculée par la formule de Darcy. A partir de la valeur obtenue, il est possible d'estimer quel est le débit maximal pouvant être traité par une cassette.

### 5.3.2 Systèmes de distribution

Deux configurations sont testées : la première consiste à simplement laisser l'eau s'écouler en tête de la cassette.

La deuxième consiste à placer sur la cassette un demi-tuyau à fentes en PVC S.25, bouché des deux côtés par des plaques soudées. Il a une longueur à peine inférieure à celle de la cassette (145 cm) et une largeur à peine supérieure (315 mm), de sorte à pouvoir reposer sur ses bords latéraux. Les 64 fentes transversales s'étendent à 120° de sorte à couvrir la largeur de la cassette, et ont une largeur de 4 mm. Au centre, un canal d'écoulement est créé en collant une bande de scotch. Ainsi, l'eau est distribuée de manière homogène sur la surface de la cassette. Des petites ouvertures (environ 4 mm<sup>2</sup>) sont laissées au centre du canal pour la distribution homogène des petits débits et pour éviter la stagnation de l'eau. Le fond du tuyau est suffisamment éloigné du substrat pour permettre la mise en charge de 10 cm et l'écoulement de l'eau excédentaire.



Figure 7 : cassette montée sur le banc sans le canal de distribution et avec le canal mis en place

### 5.3.3 Humectation du substrat et mesure de potentiel hydrique

Il s'est avéré que la technique la plus pratique à utiliser dans la configuration de l'essai, mais aussi la plus facilement disponible au laboratoire et la moins invasive pour le substrat, était le potentiomètre à mercure. Le système STM 2150 de SDEC consiste en micropointes (6 mm) en céramique connectées par des capillaires à un réservoir de mercure. Les capillaires sont intégrés à une réglette graduée (5 capillaires par réglette). La pointe et les capillaires sont remplis d'eau déionisée et dégazée. La pointe est introduite dans le substrat, et lorsqu'une continuité hydrique se crée, le potentiel hydrique ou la « suction », pression négative due à la rétention d'eau par le substrat, provoque une montée du mercure dans le capillaire. Le réservoir de mercure et les capillaires sont fixés à une règle, graduée en millibars. La surface du mercure représente le niveau de référence (0 mbar).

Pour chaque débit, idéalement le substrat devrait être relativement sec (environ 400 mbar de suction). Le potentiel initial est mesuré, le débit est appliqué, et l'évolution du potentiel est mesurée par 18 (+2) capteurs distribués sur la largeur de la cassette, sur trois niveaux de hauteur (6/ 6 /6), enfoncés dans le substrat par les ouvertures sur la grille, jusqu'au centre de la cassette. Deux débits sont testés, un débit faible ne provoquant pas de mise en charge, et ensuite le débit le plus fréquent attendu, provoquant une mise en charge (à priori 0.0009 m<sup>3</sup>/s, correspondant à une pluviométrie de 0.2 mm/10 min), pour les deux substrats.

Pour chaque débit, il est prévu d'effectuer l'essai pour deux configurations, d'abord en absence de canal de distribution, et ensuite, après dessèchement, répété avec le canal de distribution.

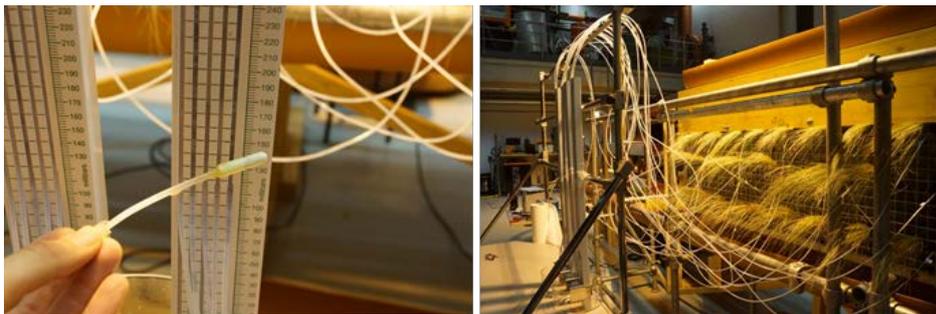


Figure 8 : montage des pointes potentiométriques

## 5.4 Modélisation des flux d'infiltration à l'aide de Hydrus 2D

Le logiciel Hydrus 2D (Simunek et al. 2011) permet de simuler le mouvement de l'eau, de la chaleur et de solutés dans des milieux poreux à saturation variable. Pour les écoulements saturés et non-saturés, le programme utilise des éléments finis linéaires pour résoudre numériquement l'équation de Richards :

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

### 5.4.1 Ajustement du modèle hydrodynamique grâce à la courbe caractéristique de rétention d'eau

Si la porosité du substrat est modélisée par des faisceaux de capillaires de différents diamètres, avec des caractéristiques de rétention équivalentes au substrat réel, la fonction de rétention de l'eau indique la répartition de la taille de pores à partir de laquelle la conductivité hydraulique non-saturée peut être prédite.

La teneur en eau ou la saturation effective du sol (le rapport entre la teneur en eau pour un potentiel donné et la teneur maximale à saturation) est reliée au potentiel hydrique par une relation de type exponentiel.

Plusieurs modèles, élaborés soit par l'analyse des moments soit par ajustement, ont été proposés par différents auteurs. Ces modèles contiennent des paramètres liés à la distribution de la taille des pores et au potentiel d'entrée d'air (zone de potentiel faible dans laquelle la teneur en eau reste à saturation). Même s'il est difficile de trouver un modèle adapté à tous les types de sols, la version générale proposée par Van Genuchten (1980) est la plus couramment utilisée.

La conductivité hydraulique du substrat non-saturé peut être exprimée sous forme de conductivité relative, qui est le rapport entre la conductivité non-saturée à la conductivité à saturation. Cette conductivité relative est exprimée en fonction de la saturation effective  $S_e$ , et le rapport entre la part de la porosité occupée par l'eau pour un taux de saturation donné et la porosité totale (Mualem 1976). Ces parts de porosité sont obtenues en intégrant de la fonction  $r f(r) dr$  exprimant la somme des rayons de capillaires remplis entre 0 et  $\theta$  et 0 et  $\theta_{sat}$  respectivement. Si la loi capillaire est appliquée ( $r = C/h$ ), et que la capacité capillaire  $C$  est exprimée comme la pente de la courbe de rétention ( $d\theta/dh$ ), il est possible d'exprimer les parts de porosité à partir des données de la courbe de rétention caractéristique.

Le modèle doit être ajusté à travers la relation entre la teneur en eau, le potentiel hydrique correspondant ( $\theta(h)$ ), et la conductivité hydraulique à saturation  $K_s$ , qui ont été établis expérimentalement à Hepia pour les deux substrats utilisés (contenant respectivement 30 et 50% de biochar). Ces valeurs expérimentales ont été utilisées pour ajuster les paramètres des équations basées sur les modèles de Mualem et Van Genuchten utilisés par le logiciel pour mettre en lien le taux de saturation avec le potentiel matriciel et la conductivité hydrique (Soutter et al. 2007, Simunek et al. 2012):

*Teneur volumétrique en eau*

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) * \left( \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

*Saturation effective*

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left( \frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

*Conductivité hydraulique*

$$K(\theta) = K_s \times S_e^{0.5} \left( 1 - (1 - S_e)^{\frac{n-1}{n}} \right)^2$$

Les paramètres  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$  et  $n$  sont déduits à partir de la courbe  $\theta(h)$  obtenue par des mesures en laboratoire, par un ajustage grâce à l'outil Solveur d'Excel (annexe 3).

## 5.5 Modélisation de la distribution de l'eau sur le système et des conditions hydriques par cassette

Il s'agit d'élaborer des prévisions sur une période d'une année sur le bilan hydrique de chaque cassette pour la configuration prévue sur le terrain, donc un enchaînement de 10 cassettes en cascade (en série).

Une configuration « en parallèle » a aussi été prise en considération, mais s'avère problématique d'un point de vue spatial et de partage des flux, car elle nécessiterait la mise en place d'une chambre de partition : les matières en suspension risqueraient d'y sédimenter au lieu d'être distribuées sur les cassettes.

A titre de comparaison, des prévisions sont proposées pour les deux configurations.

Une année « moyenne de pluviométrie » (moyennes journalières par intensité sur 19 ans) et d'évapotranspiration (moyennes journalières entre 2006 et 2013) est élaborée à partir des données météorologiques à l'aide du logiciel Matlab.

Pour chaque jour, les événements sont répartis en classes d'intensités, et en classes de débits arrivant sur le système, donc sur la première cassette. Les classes d'intensités sont données par la sensibilité du pluviomètre (0.2 mm/10 min) et par l'intervalle d'intensités enregistrés sur 19 ans (entre 0.2 et 20 mm/10min), ce qui donne 100 classes en tout.

Pour chaque débit, il est déterminé de quelle façon il sera réparti sur 10 cassettes. Plusieurs hypothèses sont posées dans ce but :

- 1) Le temps de réaction du système à la pluie est rapide. Cette hypothèse peut être défendue par le temps de concentration très court du bassin versant (une portion de route de 300 m<sup>2</sup> adjacente au système), de l'ordre de 5 minutes.
- 2) Le temps d'humectation du substrat est très rapide, et la conductivité maximale est atteinte rapidement. Cette hypothèse peut être mise à l'épreuve à travers une simulation sur le logiciel Hydrus.

Le calcul utilisé est basé sur un simple modèle de type « seau percé » : le filtre est considéré avoir une capacité de rétention d'eau limitée, et la répartition de l'eau est supposée homogène sur la totalité de la surface. Le maximum d'eau qu'une cassette peut stocker consiste en la teneur en eau volumique correspondant à sa capacité de rétention ou « capacité au champ » ( $\theta_{cr}$ ), donc la quantité d'eau qui persiste dans le substrat après l'écoulement gravitaire. Pour le substrat utilisé, cette teneur en eau correspond à un potentiel de rétention hydrique d'environ 50 mbar (déductible de la courbe  $h(\theta)$ , correspond au moment de vidange des pores de diamètre entre 10 et 50  $\mu\text{m}$  (Gobat 1998).

Le débit entrant correspond à l'intensité mesurée sur le terrain, multipliée par la surface du bassin versant réduite par le coefficient de ruissellement, et rapportée à la surface de la cassette. L'apport direct par la pluie sur la cassette est négligé.

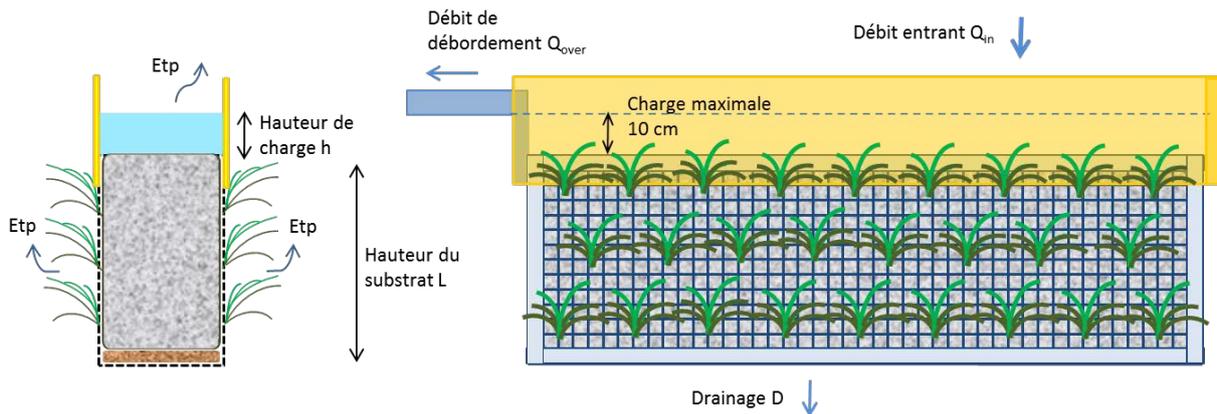


Figure 9 : Schéma des flux considérés

### Configuration « en cascade »

Pour un débit donné, la quantité d'eau qui s'infiltré dans une cassette est déterminée par la durée de l'évènement correspondant à l'intensité donnée et la conductivité hydrique de la cassette. L'eau qui ne peut s'infiltrer est transmise à la cassette suivante. Du moment qu'une cassette reçoit de l'eau, toute l'eau est drainée jusqu'à ce que la charge de 10 cm est atteinte. Donc, du moment où le débit arrivant sur la cassette dépasse celui correspondant à la charge maximale, la cassette déborde, et tout volume supplémentaire est transmis à la cassette suivante.

Pour la première cassette :

$$Q_{in}(C1) = Q_{entrée\ système} = hauteur\ de\ pluie \times E_{red}BV/S \text{ [mm/10min]}$$

où  $E_{red}BV$  est la surface du bassin versant traité multipliée par le coefficient de ruissellement (0.9) et  $S$  la surface supérieure de la cassette.

$$Si\ Q_{in}(C_n) \leq K(C_n) \times S \text{ [avec } Q_{in} \text{ transformé en m}^3/\text{s]}$$

$$\rightarrow Q_{over}(C_n) = 0$$

$$\rightarrow D(C_n) = Q_{in}(C_n)$$

Caissettes suivantes :

$$Q_{in}(C_n) = Q_{over}(C_{n-1})$$

$$Si\ Q_{in}(C_n) \leq K(C_n) \times S$$

$$\rightarrow Q_{over}(C_n) = 0$$

$$\rightarrow D(C_n) = Q_{in}(C_n)$$

$$Si\ Q_{in}(C_n) > K(C_n) \times S$$

$$\rightarrow D(C_n) = K(C_n) \times S$$

$$\rightarrow Q_{over}(C_n) = Q_{in}(C_n) - K(C_n) \times S$$

### *Configuration « en parallèle »*

A l'entrée du système, le débit est partagé de façon équivalente sur les dix cassettes. La configuration exacte de ce partage n'a pas été fixée. La démarche de calcul de volumes drainés est effectuée pour une cassette et le principe est identique que précédemment.

Pour les deux configurations, un premier modèle est élaboré sans prendre en compte la teneur en matières en suspension dans l'eau : la conductivité hydraulique des cassettes est supposée constante et égale à  $K_{init}$ .

Mais la charge polluante attendue est aussi élevée que ses effets de colmatage ne peuvent être négligés. De plus, la charge superficielle spécifique est relativement élevée (100 m<sup>2</sup> de chaussée par m<sup>2</sup> de surface de traitement). Il a été donc nécessaire d'élaborer un modèle prenant en compte l'évolution de la conductivité hydraulique du substrat en fonction des sédiments apportés par cassette.

### *Prise en compte du colmatage*

La relation entre la masse de sédiments déposée et la conductivité hydraulique a été basée sur l'article de Le Coustumer et al. 2012. Dans ce travail, diverses configurations de biofiltres (variation du substrat, de la charge hydraulique spécifique, de la concentration en polluants, de type de végétation) ont été exposées de façon régulière à des flux d'eau contenant une teneur en sédiments constante, dans le but de simuler la charge annuelle totale. Parmi les substrats utilisés, un est à la base de terre, compost et un mélange de perlite-vermiculite (30%). Son  $K_s$  est relativement élevé, ce qui laisse supposer que, par ses propriétés hydrodynamiques, il pourrait être apparenté à un mélange de compost et de biochar. L'évolution du  $K_s$  avec la charge sédimentaire laisse supposer une relation exponentielle. Une courbe de tendance appliquée à la relation  $K_s$  (g MES/m<sup>2</sup>) obtenue sur la moyenne des résultats sur toutes les configurations testées est obtenue avec un  $R^2$  de 0.97.

L'évolution du  $K$  dépend de la quantité de sédiments déposés sur la cassette par la relation suivante (estimé à partir des résultats de Le Coustumer et al. 2012):

$$MES_d \left[ \frac{g}{m^2} \right] = Conc(MES) \left[ \frac{g}{m^3} \right] \times Volume \text{ drainé cumulé} [m^3] / S [m^2]$$

$$K = K_{init} \times e^{(-0.0006 MES_d)}$$

La concentration des MES à prendre en compte est une question délicate. Pour la surface du bassin versant traitée (300 m<sup>2</sup>) et le nombre de véhicules par jour (18000), les indications dans la littérature varient entre 100 (Pagotto 2000) et 500 mg/l (VSA 2002). Pour illustrer le fonctionnement du modèle, la concentration de 150 mg/l a été retenue. Des valeurs plus élevées peuvent être testées pour définir une marge de sécurité.

Il est supposé que le premier jour du fonctionnement du système, la conductivité est égale à  $K_{init}$  pour toutes les cassettes. Pour obtenir la quantité des MES déposées, il est par la suite nécessaire de prendre en compte les volumes écoulés précédemment sur chaque cassette. Dans ce modèle, la concentration des matières en suspension est supposée constante.

Lorsque la répartition par cassettes a été effectuée, les données d'évapotranspiration  $y$  sont associées, et des bilans hydriques peuvent être calculés.

Les données d'évapotranspiration de référence (selon la méthode de Turc) sont obtenues à partir de la base de données *agrométéo.ch* pour la station de Düdingen (FR). Il s'agit de données annuelles par jour, moyennées sur 7 ans (2006-2012).

La surface exposée à l'évapotranspiration correspond aux surfaces latérales et à la surface supérieure, et représente environ  $2 \text{ m}^2$  (à priori la surface supérieure ne sera initialement pas végétalisée et donc sera exposée uniquement à l'évaporation, mais dans ce modèle elle est aussi prise en compte).

Le stock maximal pour une cassette est fixé à une teneur en eau correspondant à la capacité de rétention. L'évolution du taux d'humidité du substrat est calculée tout au long de l'année, et comparé au taux d'humidité correspondant au point de flétrissement, correspondant à une succion de 16 bar, estimé à 5% d'humidité résiduelle (Gobat et al. 1998, par analogie à un sol limono-sableux : toutefois, cette valeur devra être confirmée par des mesures sur le substrat utilisé, à plusieurs égards spécifique). A ce taux-là, pour la majorité des plantes, le potentiel hydrique est trop élevé pour que les racines puissent absorber l'eau, et la plante ne peut y survivre longtemps (quelques heures à quelques jours, dépendant de l'espèce).

Il est supposé qu'au début du fonctionnement, le substrat contient une quantité d'eau correspondant à la capacité de rétention. Ensuite, si la réserve présente additionnée de l'apport global (bilan entre l'infiltration et l'évapotranspiration) dépasse la capacité de rétention, la réserve reste égale à  $\theta_{cr}$  et le surplus est drainé. Sinon, la réserve est recalculée.

$$R(\theta_{cr}) = \text{Volume substrat} [m^3] \times \theta_{cr}$$

$$\text{Si } (Q_{in} - ETP) + R_{j-1} \geq R(\theta_{cr}) \rightarrow R_j = R(\theta_{cr})$$

$$\text{Si } (Q_{in} - ETP) + R_{j-1} < R(\theta_{cr}) \rightarrow R_j = R_{j-1} + (Q_{in} - ETP)$$

La teneur volumique en eau  $\theta$  est obtenue chaque jour à partir de la réserve en eau présente dans le substrat.

## 6 Résultats

### 6.1 Réactions du substrat et conductivité hydraulique

#### Observations générales

- 1) Pratiquement aucun écoulement préférentiel (le long du grillage, au niveau de l'insertion des plantes...) n'a été observé, même sous charge.
- 2) Pour les deux cassettes, la mise en charge se fait rapidement, en environ 5 minutes suite au début de l'écoulement, déjà pour le débit testé le plus faible, 0.0001 m<sup>3</sup>/s ou 0.1 l/s, correspondant à l'évènement le plus faible enregistré, 0.2 mm/10 min, qui est aussi le plus fréquent. A peu près au même moment, le drainage commence.
- 3) Sans système de distribution, il y a un affouillement en tête de cassette, au point d'incidence du flux et des fragments de substrat, en particulier le charbon, plus léger, flottent et sont emportés hors de la cassette en cas de débordement : une grille de rétention a pour cette raison été posée à la surface du substrat.

#### Conductivité hydraulique

Cassette BC30%			Conductivité à saturation $K_s$ 276 mm/h			
Surface substrat $S [m^2]$	Charge $\Delta h$ [m]	Hauteur substrat $L$ [m]	$K(10cm) =$ $Q/(((\Delta h+L)/L)*S) [m/s]$	$K(10cm)$ [mm/h]	$K(10cm)$ [mm/10 min]	
0.3	0.00021	0.1	0.000648	2333.33	388.89	

Cassette BC50%			Conductivité à saturation $K_s$ 1140 mm/h			
Surface substrat $S [m^2]$	Charge $\Delta h$ [m]	Hauteur substrat $L$ [m]	$K(10cm) =$ $Q/(((\Delta h+L)/L)*S) [m/s]$	$K(10cm)$ [mm/h]	$K(10cm)$ [mm/10 min]	
0.3	0.00005	0.1	0.000154	555.56	92.59	

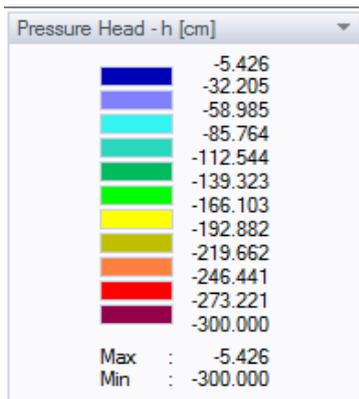
Le substrat BC30% admet un débit d'environ 0.2 l/s pour atteindre le niveau de débordement (stabilisation en 15 minutes à 10 cm). Ce débit permet de déterminer approximativement la conductivité hydraulique dans des conditions réelles et le débit qu'une cassette peut au maximum traiter avant débordement.

Pour le substrat BC50%, malgré une conductivité à saturation plus élevée, ce débit s'avère plus faible, de l'ordre de 0.05 l/s. Plusieurs raisons peuvent mener à ces différences, en particulier les conditions de mesure : en effet, la méthode de mesure de la conductivité à saturation se fait dans des conditions contrôlées (pré-saturation du substrat pendant 24h, absence d'écoulements préférentiels), et est donc beaucoup plus précise. Le conditionnement du substrat dans les cassettes et la présence de végétation créent des conditions d'écoulement très différentes. Ces différences entre les valeurs sur colonne et dans la cassette devront être expliquées par des tests supplémentaires.

## 6.2 Evolution du bulbe d'humectation liée à la répartition du flux sur la cassette par mesure de potentiel hydrique

### 6.2.1 Modélisation de la répartition des flux d'infiltration par Hydrus 2D

Légende

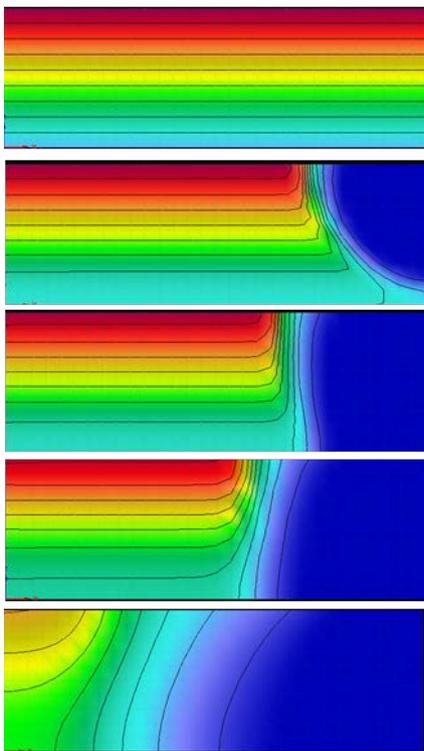


*Temps d'acquisition*  
**0, 2.5, 5, 10, 60 min**

Figure 10 : légende des niveaux potentiométriques

#### 6.2.1.1 Cassette BC30%

Débit faible (0.05 l/s), distribution en tête de cassette



150 cm

50 cm

Débit faible (0.05 l/s), distribution homogène (tuyau à fentes)

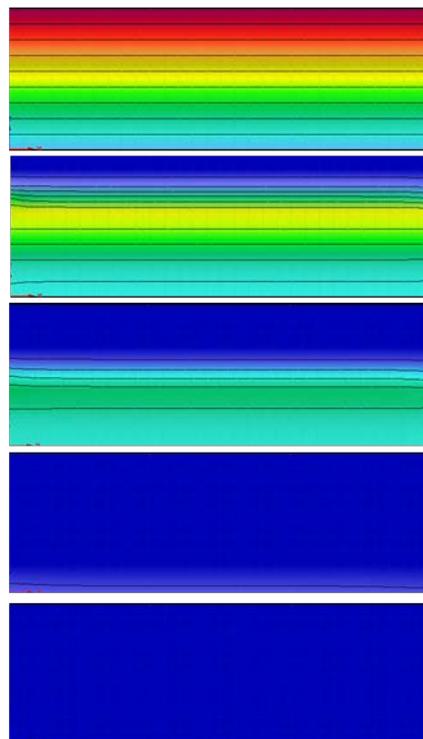
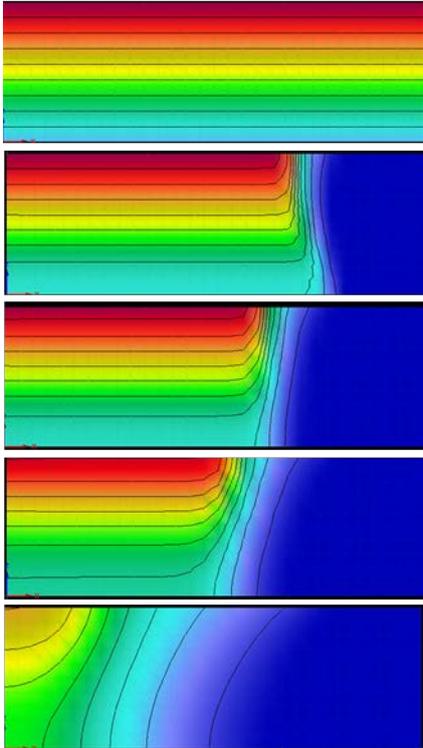


Figure 11 : débit faible sur cassette BC30%

Débit standard (0.1 l/s), distribution en tête de cassette



Débit standard (0.1 l/s), distribution homogène (tuyau à fentes)

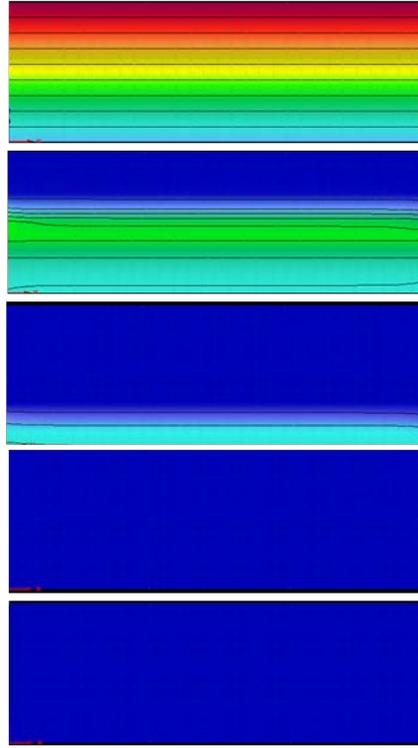
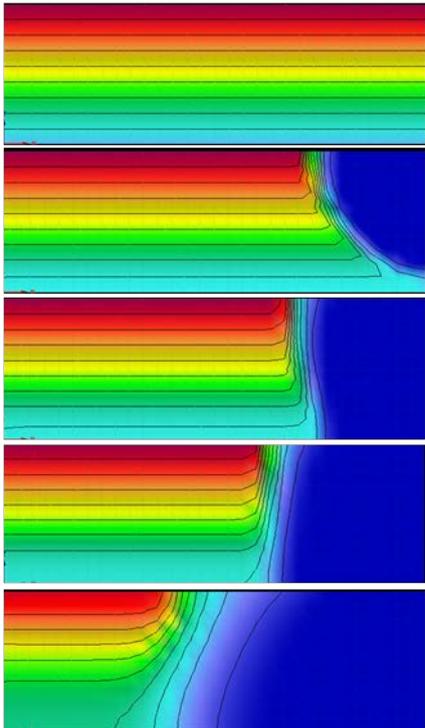


Figure 12 : débit standard sur cassette BC30%

### 6.2.1.2 Cassette BC50%

Débit faible (0.05 l/s), distribution en tête de cassette



Débit faible (0.05 l/s), distribution homogène (tuyau à fentes)

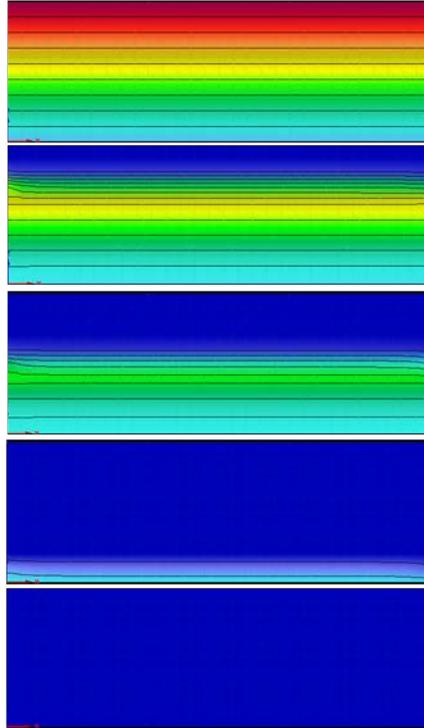
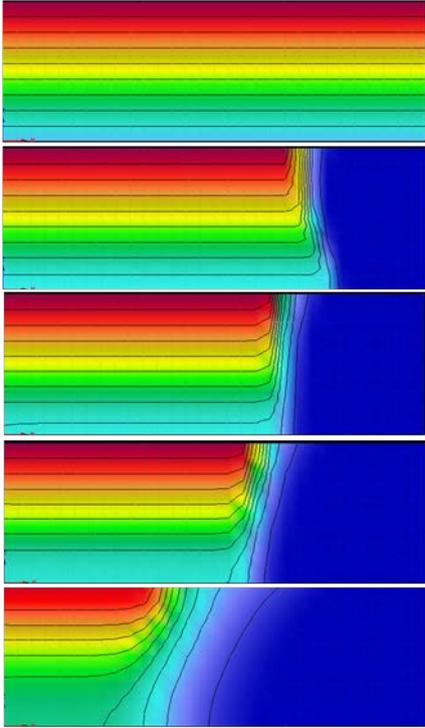


Figure 13 : débit faible sur cassette BC50%

Débit standard (0.1 l/s), distribution en tête de cassette



Débit standard (0.1 l/s), distribution homogène (tuyau à fentes)

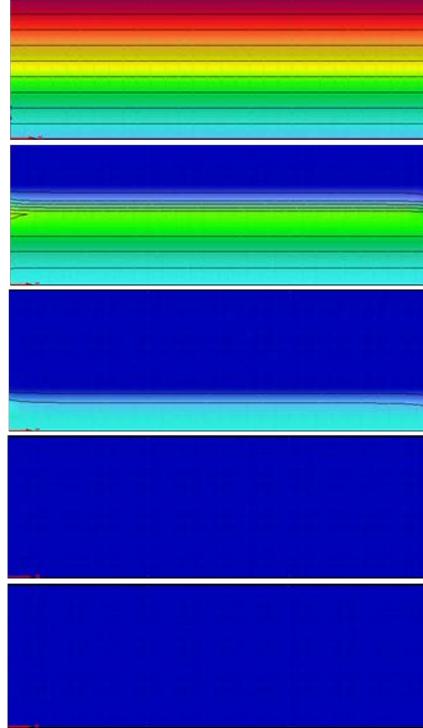


Figure 14 : débit standard sur cassette BC30%

## 6.2.2 Mesures de l'évolution du potentiel hydrique par suivi potentiométrique

Lors des essais, le substrat étant très hétérogène, plusieurs tentatives se sont soldées par le décrochage des potentiomètres (entrée d'air). Il s'est avéré qu'il était nécessaire de placer les potentiomètres dans un substrat très humide dans le but d'assurer la mise en place de la continuité hydrique. Ensuite, le substrat doit sécher pour arriver à des potentiels de succion relativement élevés de sorte à pouvoir suivre l'évolution de l'humectation. Ce séchage a pris beaucoup de temps (environ 15 jours en conditions du laboratoire). Des dispositifs de chauffage et de ventilation ont dû être mis en place pour abaisser ce temps à une semaine. Etant donné le temps imparti pour ces essais, tous ceux prévus n'ont pas pu être réalisés et le choix s'est porté sur la question considérée la plus critique, la distribution homogène des flux pour des débits faibles (sans mise en charge). En effet, sur la conclusion du suivi visuel des événements (drainage uniquement sur une petite partie de la cassette) et des modèles réalisés, un système de distribution du flux s'impose d'emblée. Une cassette uniquement a donc été testée (BC30%) avec un canal de distribution, pour un débit de 0.05 l/s ne provoquant pas de mise en charge, et ensuite pour un débit de 0.1 l/s, débit le plus fréquent attendu produisant une mise en charge. Ce test permet de valider l'efficacité du système de répartition et d'avoir une base de comparaison avec le modèle.

Schéma d'insertion

						Profondeur d'insertion depuis la surface (cm)	Hauteur par rapport à la surface du mercure (cm)
5	3	1	4	2	5	-4	27
			1			-12	19
4	2	5	3	1	4	-21	10
			2			-29	3
3	1	4	2	5	3	-38	-5
b = blanc    v = vert    o = orange    b = bleu						<i>Réservoir placé 8 cm en-dessous de la graduation du 0 mbar</i>	



Figure 15 : installation des potentiomètres

6.2.2.1 Test avec système de distribution, débit 0.05 l/s – comparaisons entre le résultat des mesures et le modèle Hydrus



Figure 16 : Débit 0.05 l/s sur cassette BC30%, en présence du canal de répartition de flux

6.2.2.2 Test avec système de distribution, débit 0.1 l/s – comparaisons entre le résultat des mesures et le modèle Hydrus (courbes HD)

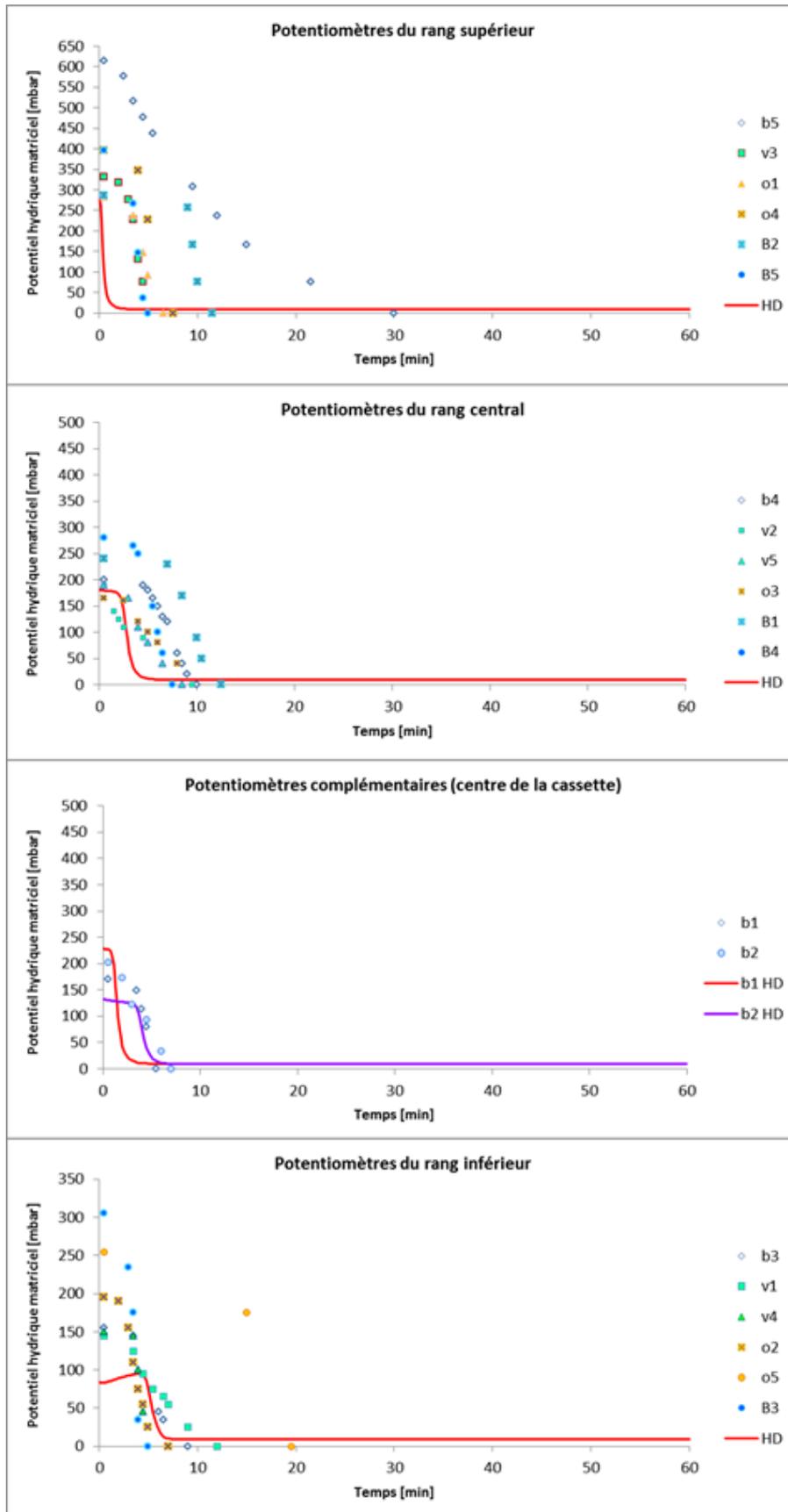
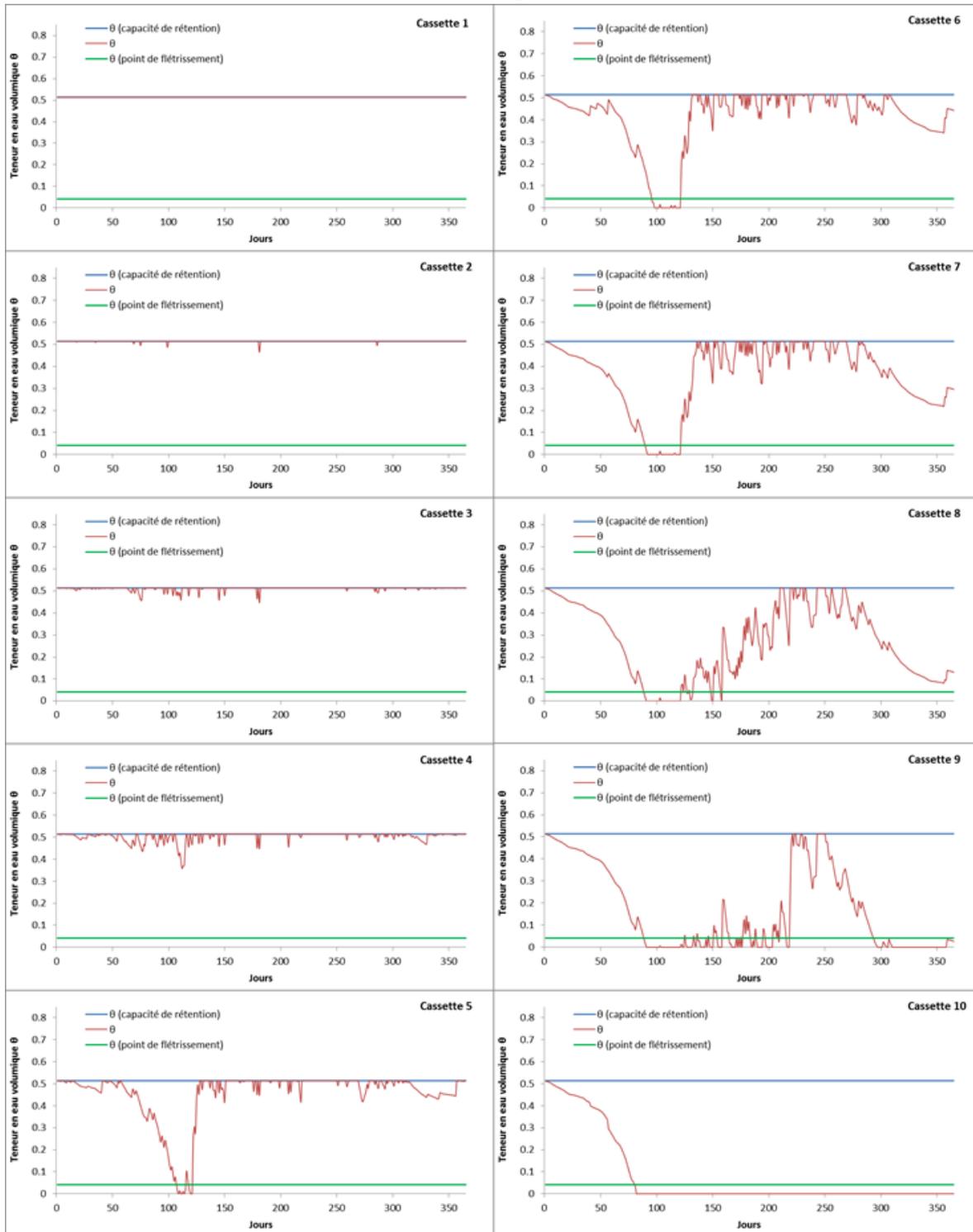


Figure 16 : Débit 0.1 l/s sur cassette BC30%, en présence du canal de répartition de flux

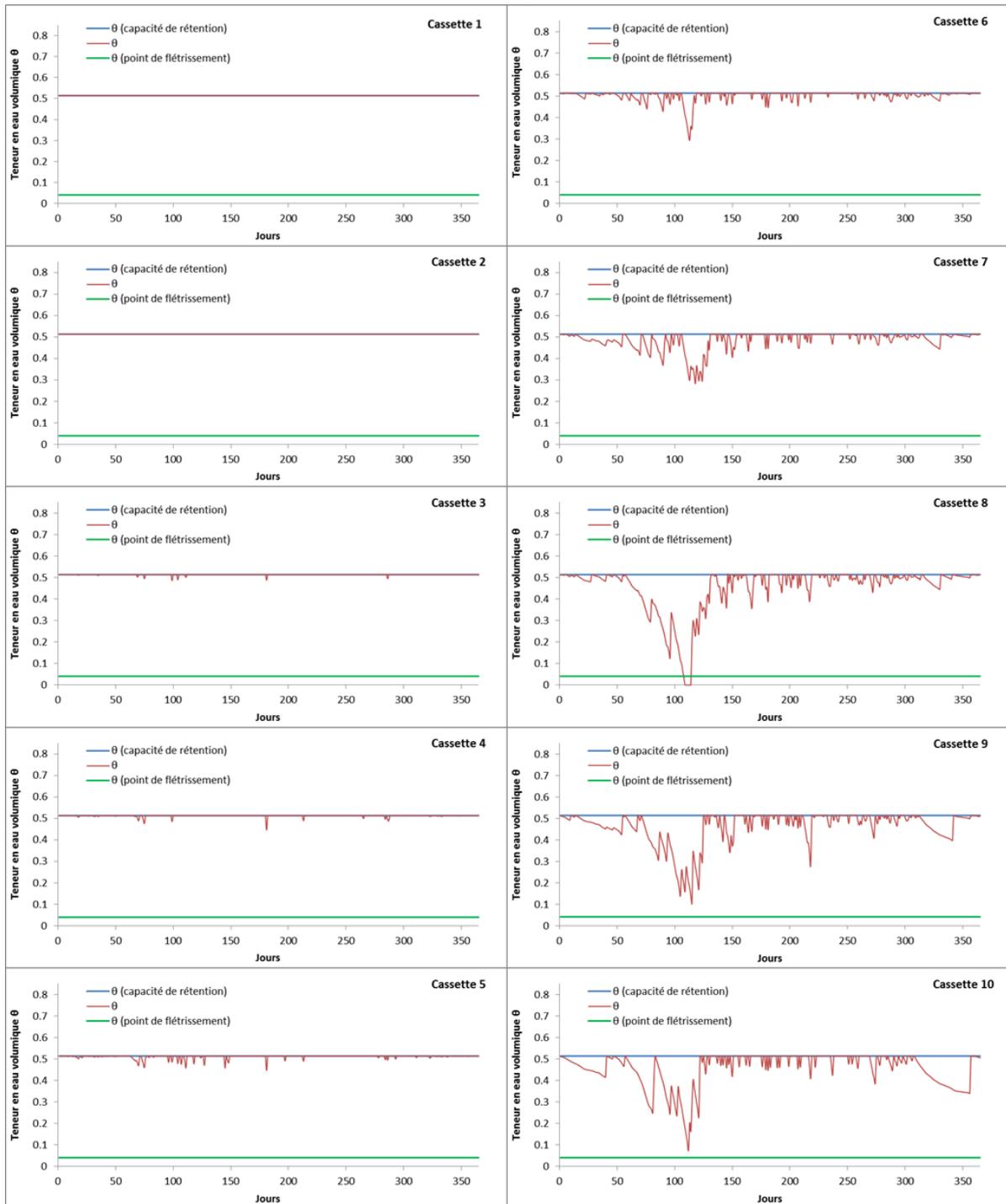
## 6.2.3 Modélisation de la distribution de l'eau sur le système et des conditions hydriques sur les cassettes (conductivité et réserve en eau des cassettes)

### 6.2.3.1 Installation des cassettes en série - Modèle sans prise en considération du colmatage – Conductivité hydrique $K$ considérée constante

#### 6.2.3.1.1 10 cassettes BC30% : $K = 389 \text{ mm}/10\text{min}$ Pourcentage de volume annuel traité 96.6%



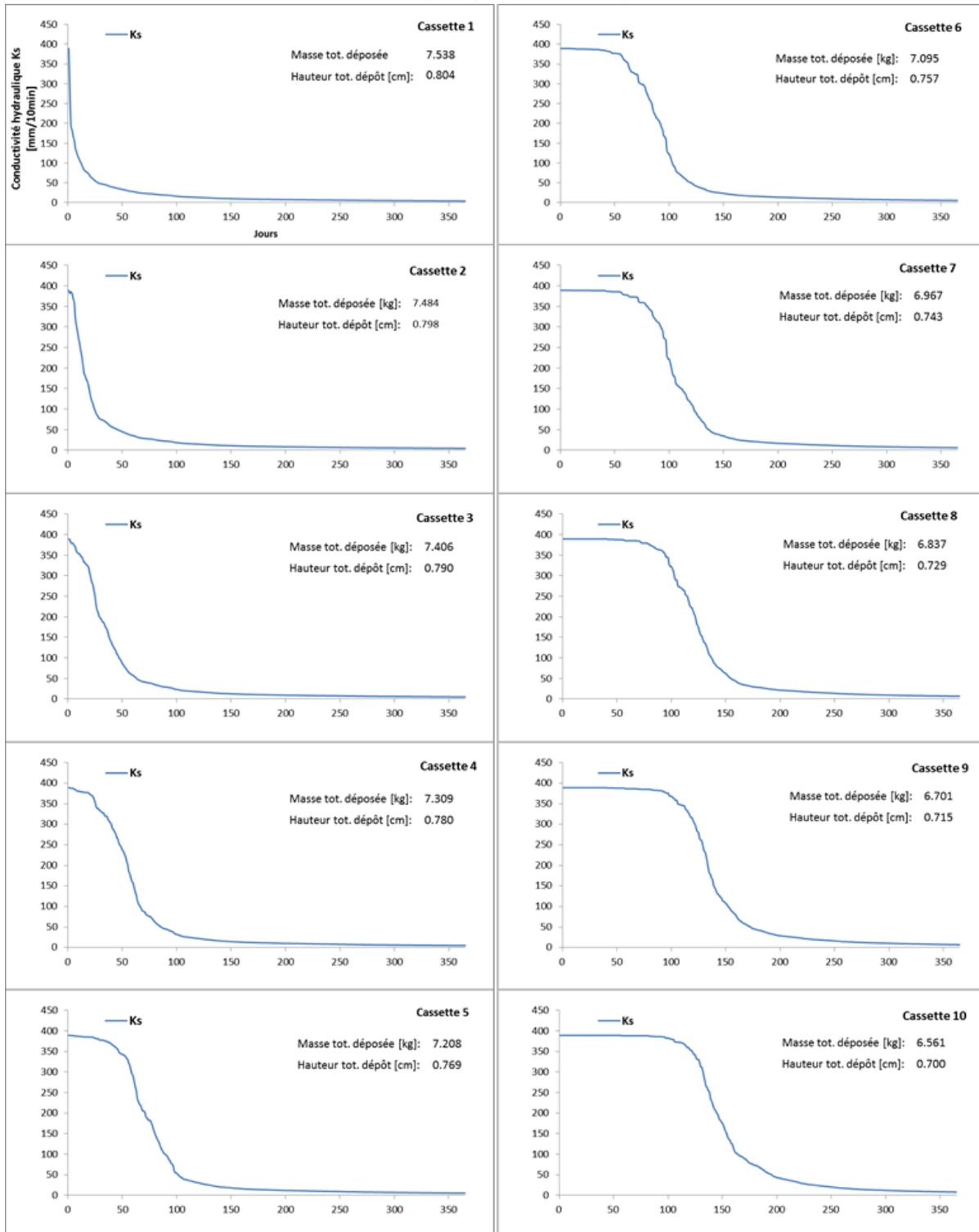
**6.2.3.1.2 10 cassettes BC50% : K = 93 mm/10min**  
**Pourcentage de volume annuel traité 96.7%**



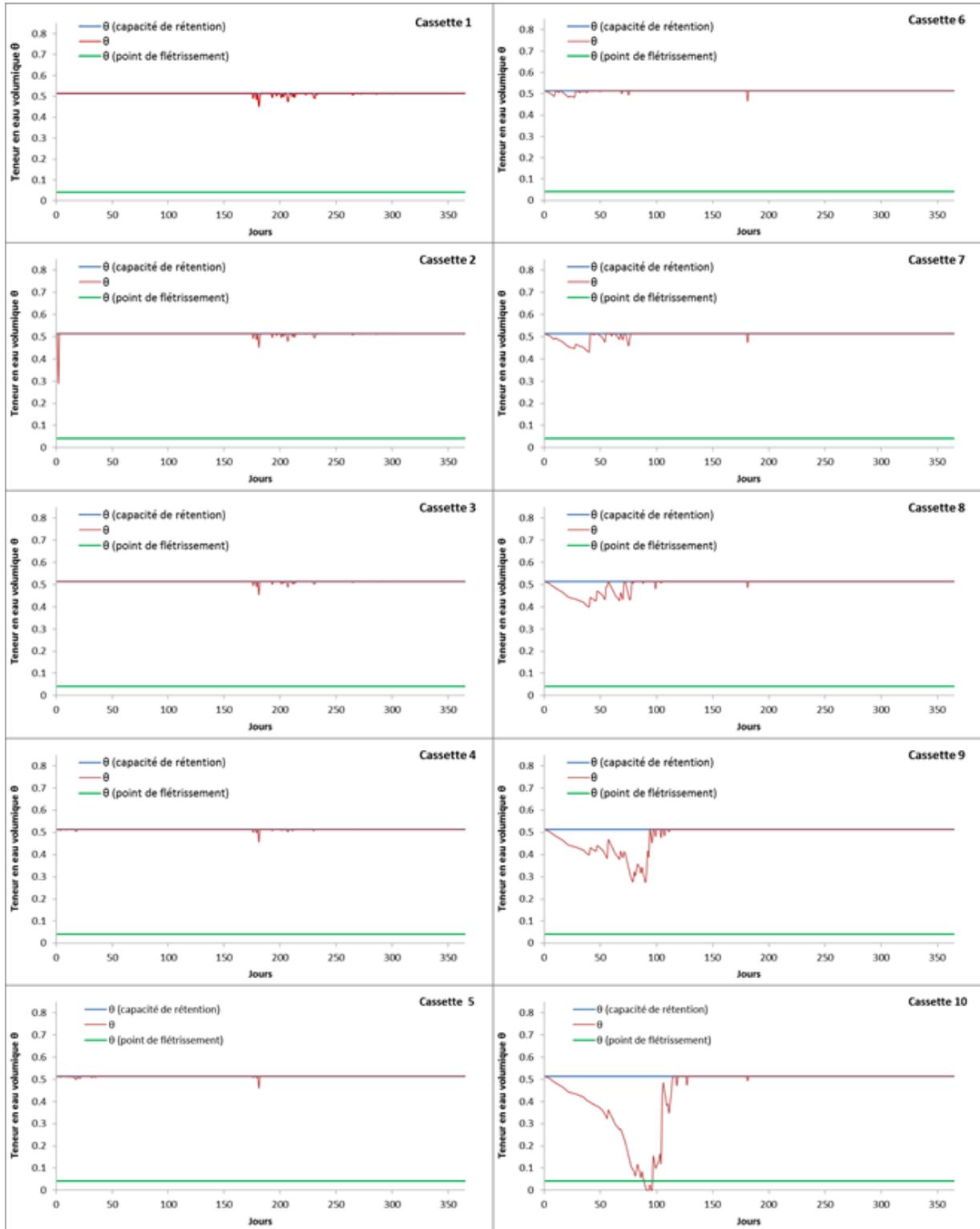
6.2.3.2 Installation des cassettes en série - Modèle avec prise en considération du colmatage - Résultats avec une charge moyenne en MES de  $150 \text{ g/m}^3$  - La conductivité hydrique  $K$  évolue avec la quantité d'eau drainée

6.2.3.2.1 10 cassettes BC30% :  $K$  initial =  $389 \text{ mm}/10\text{min}$   
 Pourcentage de volume annuel traité 54.4%

6.2.3.2.1.1 Evolution de la conductivité hydrique avec le temps

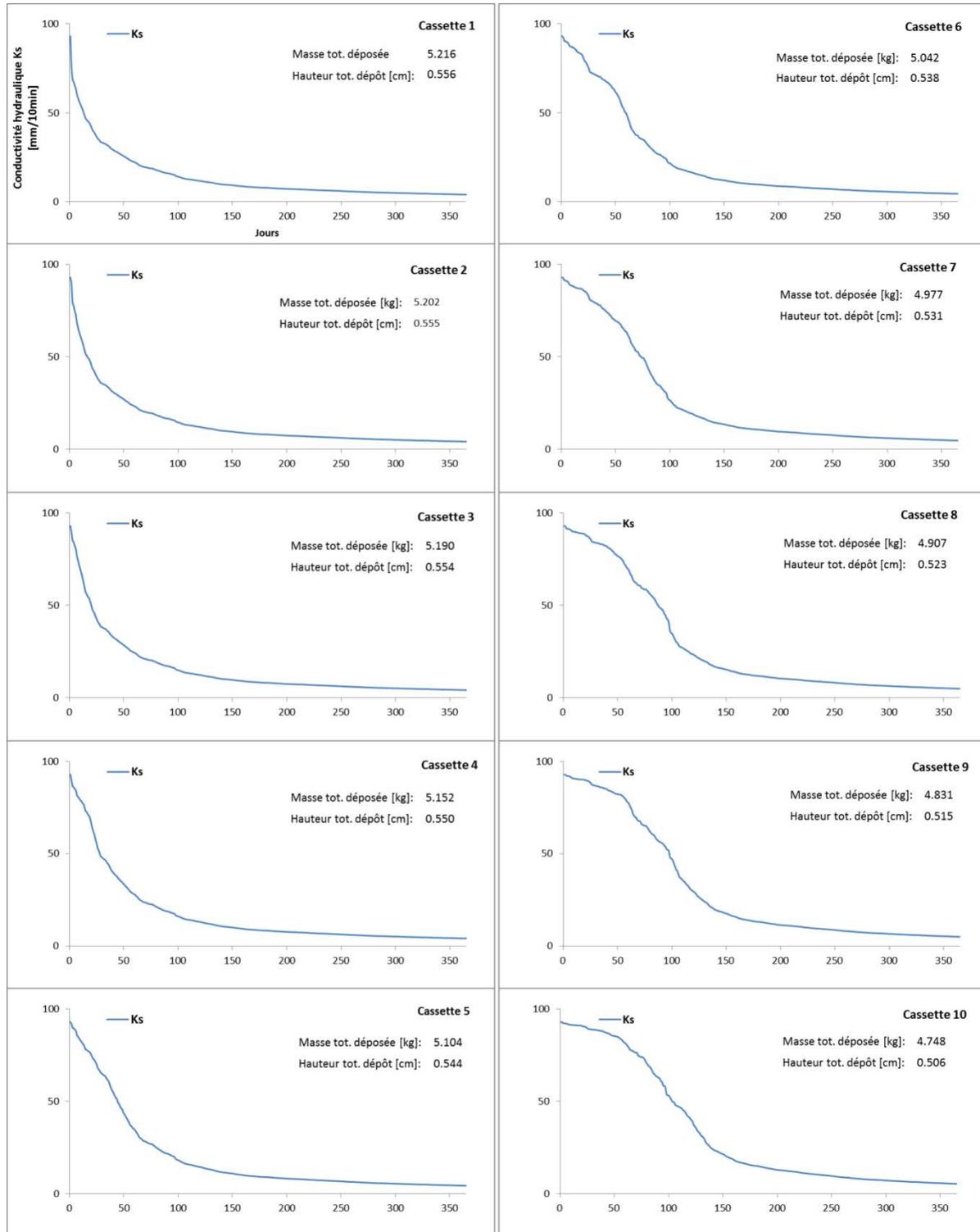


### 6.2.3.2.1.2 Evolution de la réserve en eau des cassettes

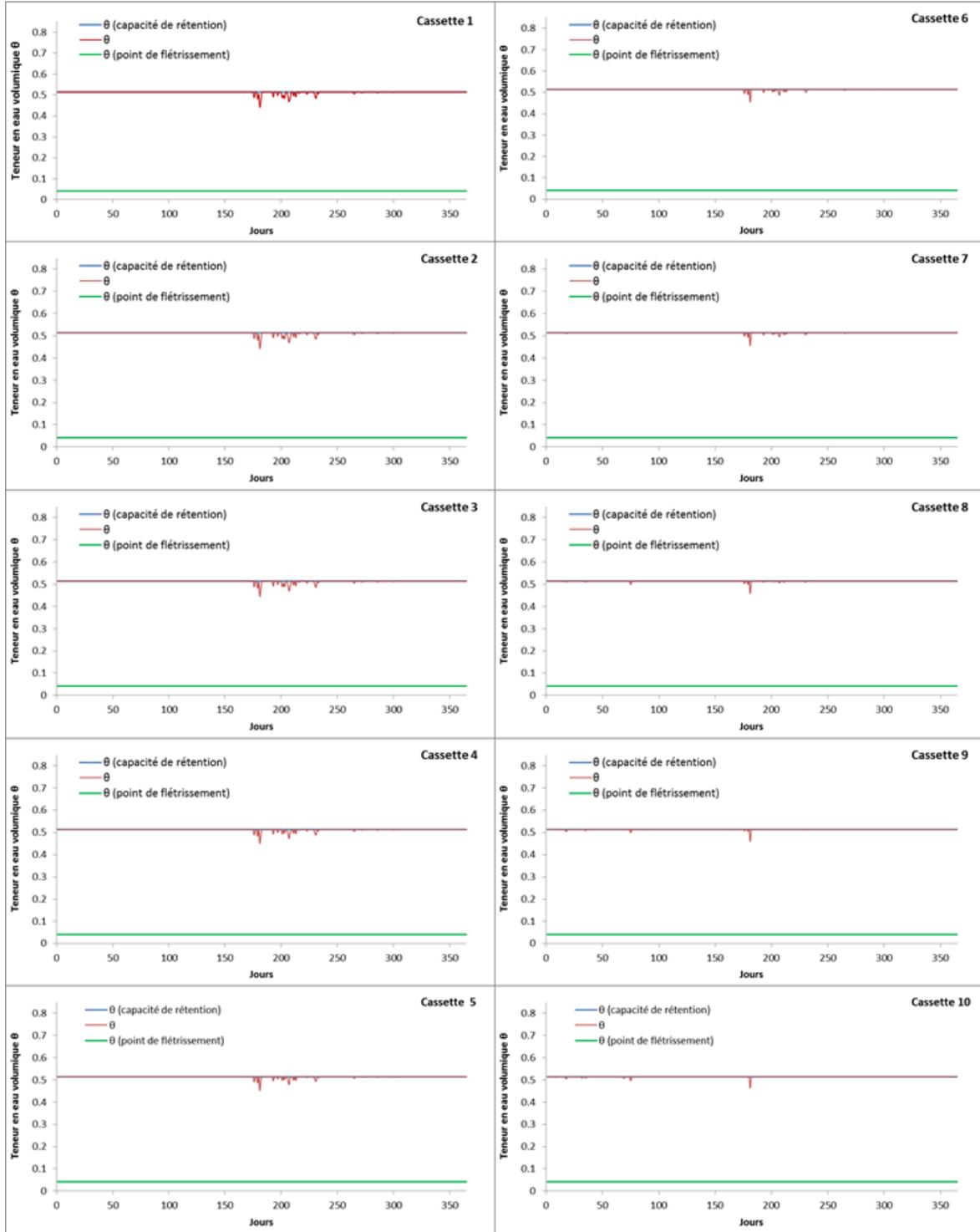


**6.2.3.2.2 10 cassettes BC50% : K initial = 93 mm/10min  
 Pourcentage de volume annuel traité 38.6%**

*6.2.3.2.2.1 Evolution de la conductivité hydrique avec le temps*



### 6.2.3.2.2 Evolution de la réserve en eau des cassettes

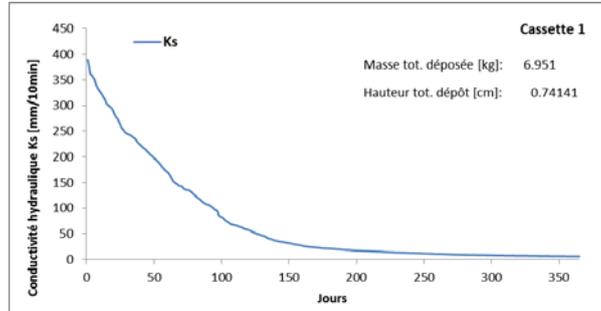


6.2.3.3 Installation des cassettes en parallèle : chaque des 10 cassettes est exposée aux mêmes débits, correspondant au dixième du débit total entrant sur le système- Modèle avec prise en considération du colmatage - Résultats avec une charge moyenne en MES de  $150 \text{ g/m}^3$

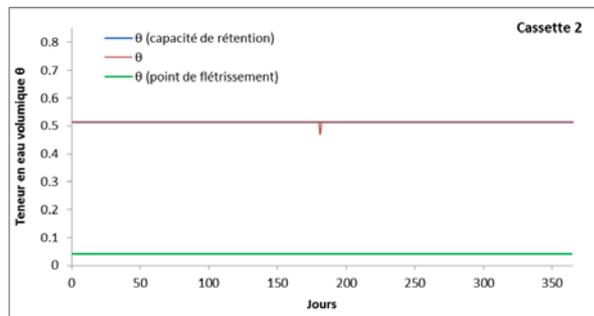
6.2.3.3.1 Cassette BC30% : K initial = 389 mm/10min

Pourcentage de volume annuel traité 53.2%

6.2.3.3.1.1 Evolution de la conductivité hydrique avec le temps



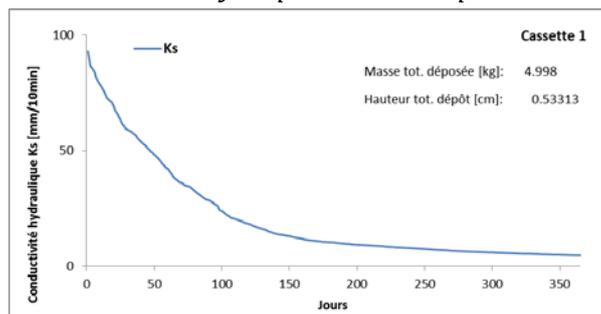
6.2.3.3.1.2 Evolution de la réserve en eau de la cassette



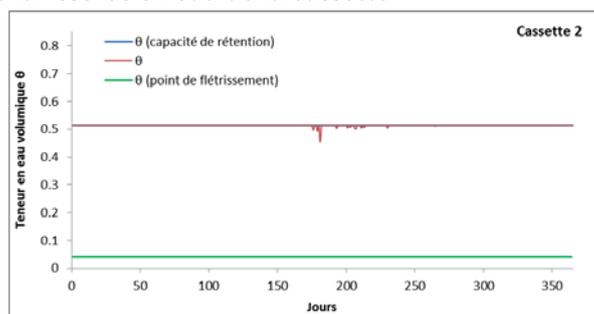
6.2.3.3.2 Cassette BC50% : K initial = 93 mm/10min

Pourcentage de volume annuel traité 38.3%

6.2.3.3.2.1 Evolution de la conductivité hydrique avec le temps



6.2.3.3.2.2 Evolution de la réserve en eau de la cassette



## **7 Discussion**

### **7.1 Réaction du substrat et conductivité hydraulique**

#### **7.1.1 Différences entre résultats en laboratoire et en cassette**

Lors des tests de conductivité hydrique, des différences importantes ont été constatées entre les essais en laboratoire et les essais en cassette.

Plusieurs explications peuvent être données à ces différences, auxquelles l'on pouvait s'attendre :

- La conductivité hydrique est plus faible se justifie par un taux de saturation plus bas.
- La conductivité plus élevée peut s'expliquer par des flux préférentiels dus à des espaces entre le substrat et la cassette et à la présence des végétaux.

Toutefois, la variation est opposée dans le cas des deux substrats : plus élevée qu'attendu pour le premier, et plus faible pour le deuxième. Des mesures de conductivité à saturation devraient être reconduites, et des tests supplémentaires doivent être effectués pour vérifier le comportement du substrat (réorganisation, séparation des phases, compactage hydraulique rapide...).

#### **7.1.2 Optimisation de la conception de la cassette**

En lien avec la conception de la cassette, les points mis en évidence suivants doivent être réglés :

- 1) Lors du débordement, des fragments de substrats flottent et sont lessivés. Avec le temps, le substrat risque de se désagréger, et des résidus de matériaux organiques ne doivent pas aboutir au cours d'eau. La mise en place d'une grille suffisamment dense est nécessaire sur la surface du substrat. La grille appliquée dans cet essai, avec des mailles d'environ 6 mm, n'était pas suffisante pour régler ce problème.
- 2) Les observations, les mesures et les modèles indiquent qu'un système de répartition homogène du flux est nécessaire, pour éviter l'affouillement en tête de cassette, et pour des débits ne faibles ne provoquant pas de mise en charge, permettre un apport d'eau homogène pour les végétaux et une répartition homogène des polluants sur le substrat.

## **7.2 Dynamique d'humectation**

### **7.2.1 Modélisation sur Hydrus 2D**

Les modèles confirment, d'une part, la nécessité d'une répartition homogène des flux : la perméabilité relativement élevée du substrat ne permet pas de répartition homogène pour des flux sans mise en charge. L'extrémité opposée à l'entrée d'eau reste sèche, en particulier pour le substrat très perméable.

D'autre part, l'hypothèse que le substrat sature rapidement dès le début d'un événement, peut être considérée valable, ce qui permet d'utiliser directement la conductivité maximale pour le calcul des bilans hydriques.

Toutefois, la mise en charge des cassettes n'a pas pu être modélisée de manière satisfaisante par Hydrus 2D : un travail plus approfondi est nécessaire pour réaliser une simulation optimale. Il serait éventuellement nécessaire d'utiliser un logiciel permettant un traitement 3D pour modéliser l'effet-barrage des planches en bois sur les bords de la cassette.

## **7.2.2 Suivi potentiométrique de l'humectation et comparaison avec le modèle**

### *7.2.2.1 Conditions initiales*

Globalement, il existe une bonne cohérence entre la simulation et les valeurs mesurées.

Il a été particulièrement difficile de réaliser un séchage homogène du substrat : la lampe horticoles et les emplacements des chauffages d'appoint et du ventilateur ont eu un impact sur les conditions d'humidité en début d'expérience.

Lors de la simulation sur Hydrus, une diminution linéaire du potentiel initial avec la profondeur a été choisie pour les conditions initiales. Ce choix a pu être conforté par les mesures. Toutefois, la variation des conditions initiales a un impact sur les différences observées dans l'évolution entre le modèle et les mesures.

Le modèle présente une continuité « parfaite » du substrat, ce qui est moins le cas dans la réalité. Le résultat en est une surestimation de l'apport que reçoit l'extrémité opposée à l'influx.

### *7.2.2.2 Répartition de l'eau*

Le test a été effectué en premier avec un débit de 0.05 l/s : il s'est avéré que, malgré la présence du canal de distribution, l'eau ne s'écoulait pas de manière homogène. En effet, l'écoulement et drainage s'arrêtaient à la moitié de la cassette : cette observation a été prise en compte lors de la modélisation.

La répartition des débits faibles est très importante, d'une part pour l'apport de l'eau aux végétaux, et d'autre part pour le traitement des polluants. Les teneurs en polluants sont généralement plus élevées dans les débits faibles (en particulier ceux provoqués par la fonte de la neige). Suite à cette observation, le canal de distribution a été modifié : les ouvertures au centre du canal ont été réduites de 4 à 2 mm<sup>2</sup>. Une observation a permis de montrer que cette configuration permettait une répartition homogène d'un débit de 0.05 l/s (correspondant à une intensité de pluie de 0.1 mm/10 min).

## **7.3 Modélisation de la répartition de l'eau sur le système**

### *7.3.1.1 Importance du colmatage*

Il est clair qu'il est absolument nécessaire de prendre en compte l'effet du colmatage et la baisse potentielle de la conductivité hydraulique et de prévoir des marges de sécurité lors de la conception de biofiltres.

D'un point de vue du rendement hydraulique, une simple considération hydrologique pourrait laisser penser que, pour le substrat BC30%, 4 cassettes seraient suffisantes pour traiter plus que 90% de l'apport d'eau. Une fois le colmatage pris en compte, le nombre de cassettes augmente considérablement : 10 cassettes ne sont plus suffisantes.

D'un point de vue de la survie des végétaux, le problème se déplace des cassettes éloignées de l'apport pour le modèle sans prise en compte du colmatage, où ces cassettes ne sont alimentées que par des événements intenses, aux cassettes proches dans le cas de la prise en compte de la charge sédimentaire, car elles sont rapidement colmatées et il n'y a plus suffisamment d'infiltration.

### 7.3.1.2 *Nécessité de l'affinage du modèle*

Le modèle proposé est très simplifié. D'autres paramètres devraient être pris en compte dans leur effet sur l'efficacité de traitement, dont les plus importants sont :

- La dynamique de la variation de concentration et de la granulométrie des MES lors des évènements pluvieux
- La modification de l'hydrodynamique du substrat par absorption de sédiments
- La rétention/traversée des particules à travers le substrat
- L'évolution de l'activité biologique (effet du développement racinaire, activité d'invertébrés)
- La différenciation de l'effet de la compaction hydraulique de l'effet de l'accumulation de sédiments.

Un modèle plus précis devrait être élaboré pour rendre compte au mieux de ces éléments.

### 7.3.1.3 *Problème du travail avec des apports moyens par débit*

Travailler avec l'entrée d'eau journalière moyenne par débit (moyenne sur 20 ans) a été la variante la plus simple et la plus rapide pour créer une année synthétique, mais elle apporte un artefact important : dû aux débits faibles et fréquents, chaque jour de l'année « moyenne », il y a un apport d'eau, même s'il est parfois très faible. Ce petit apport d'eau suffit à recharger le réservoir des premières cassettes. La même démarche devrait être reconduite, mais en travaillant avec les années réelles, et idéalement au maximum de la précision, donc 10mm/min, pour enlever cet artefact et vérifier si les différences entre les bilans obtenus sont importantes. Si c'est le cas, il est possible de recréer l'année synthétique par une démarche fréquentielle, tout en prenant en compte la variation intermensuelle et saisonnière.

### 7.3.1.4 *Sensibilité à la teneur en MES*

Le modèle est très sensible à la concentration moyenne des MES considérée. Pour la surface du bassin versant traitée (300 m<sup>2</sup>) et le nombre de véhicules par jour (18000), les indications dans la littérature varient entre 100 (Pagotto 2000) et 500 mg/l (VSA 2002). Des informations plus précises sont nécessaires pour se rapprocher de la réalité.

Par rapport à la conception du système, l'installation en série permettrait d'homogénéiser l'apport d'eau sur toutes les cassettes. Par contre, elle pose un problème de distribution de l'eau, en particulier pour les débits faibles : elle nécessite la mise en place d'une chambre de répartition des flux et risque d'apporter des problèmes de déposition et d'obturation de conduites. D'un point de vue du colmatage et du taux d'affluent traité global, il n'y a pas de grande différence entre les deux installations.

## **8 Conclusions et perspectives**

D'un point de vue écologique et économique, étant basé sur le recyclage des déchets urbains verts, le substrat proposé par l'Hepia s'avère très intéressant pour l'application considérée. Ses propriétés d'infiltration, associées à une activité biologique, le classent parmi les meilleures options pour les systèmes de traitement des eaux de ruissellement urbaines. La conception des cassettes permet d'éviter efficacement les écoulements préférentiels, permettant une répartition efficace du flux à travers le substrat.

Des améliorations peuvent être encore apportées, dans le but de régler au mieux le problème de lessivage du substrat et de la distribution de l'eau. Tous ces éléments doivent être intégrés directement

dans le design de la cassette, dans le but d'obtenir un objet plus standardisé et aussi plus esthétique, étant donné que ces installations feront partie du paysage urbain.

Un choix approprié de la végétation devra être fait en fonction des problèmes relevés.

Pour améliorer le rendement de traitement, il a été montré que les 10 cassettes prévues risquent de ne pas être suffisantes. Augmenter nombre s'avère compliqué pour des raisons d'espace disponible : mais il est possible de jouer sur la perméabilité du substrat (taux de biochar), la surface des cassettes, et la hauteur de charge appliquée.

Pour valider l'utilisation de ce système, l'aspect dépollutif à proprement dit, la rétention des métaux lourds, des nutriments et des matières organiques doit encore être testé en laboratoire et par suivi sur le terrain. Ce test en conditions réelles permettra de lever de nombreuses incertitudes relevées.

## 9 Références bibliographiques

### Bases légales, normes et recommandations

#### *Suisse*

Loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) du 24 janvier 1991, Assemblée fédérale de la Confédération suisse (Etat le 1er janvier 2014)

Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) du 28 octobre 1998, Conseil fédéral suisse (Etat le 1er janvier 2014)

(2013). 18005 Traitement des eaux de chaussée des routes nationales (2013 V1.10) (en allemand). OFROU/ASTRA. Berne.

Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) du 1er juillet 1998, Conseil fédéral suisse (Etat le 1er juin 2012)

(2010). Strassenabwasserbehandlungsverfahren: Stand der Technik / Traitement des eaux de chaussée: état de la technique, Bundesamt für Strassen ASTRA; Bundesamt für Umwelt BAFU / Office fédéral des routes OFROU; Office fédéral de l'environnement OFEV.

VSA (Association suisse des professionnels de la protection des eaux) (2002). Evacuation des eaux pluviales. Directive sur l'infiltration, la rétention et l'évacuation des eaux pluviales dans les agglomérations.

(2002). Instructions - Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication. Bern, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

#### *Allemagne*

(2011) DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Entwicklung von Prüfverfahren für Anlagen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung in Trennverfahren.

#### *USA*

(2008). Method for Predicting the Efficiency of Proprietary Storm Water Sedimentation Devices, Wisconsin Department of Commerce; Wisconsin Department of Natural Resources Conservation Practice Standard.

(2011). Technical Guidance Manual for Evaluating Emerging Stormwater Treatment Technologies - Technology Assessment Protocol – Ecology (TAPE), Washington State Department of Ecology.

(2013). New Jersey Department of Environmental Protection Laboratory Protocol to Assess Total Suspended Solids Removal by a Hydrodynamic Sedimentation Manufactured Treatment Device, New Jersey Department of Environmental Protection.

### Ouvrages

Carlier, M. Hydraulique générale et appliquée. Editions Eyrolles, 1986.

Gobat, J.-M., Aragno, M., Matthey, W. Le sol vivant. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1998.

Mémento technique de l'eau. Degremont SA, 2005

Soutter, M., Mermoud, A., Musy, A. Ingénierie des eaux et du sol : processus et aménagement. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007.

Viau, J.-Y., Gestion et traitement des eaux pluviales. Territorial editions, 2006.

## Rapport de congrès

Bannerman, R. (2009). Laboratory Testing Guidelines for Certification of Manufactured Stormwater BMPs. World Environmental and Water Resources Congress 2009. Great Rivers.

Berthier, E. (2010). Bilan hydrique des toitures végétalisées: vers de meilleures compréhension et modélisation. Congrès Novatech 2010. GRAIE, Lyon.

Dierkes, C. Development of testing procedures for the certification of decentralized stormwater treatment facilities – results of laboratory tests. Congrès Novatech 2013. GRAIE, Lyon.

Dierschke, M. (2010). Selection of a reference material for the testing of decentralized stormwater treatment facilities. Congrès Novatech 2010. Lyon.

Uhl, M. (2013). Testing the efficiency of decentral devices for stormwater treatment. Conference Novatech 2013. GRAIE, Lyon.

## Articles scientifiques

Akan, O. (2013), Preliminary design aid for bioretention filters, Journal of hydrologic engineering.

Bertrand-Krajewski, J.-L. (1998). "Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon." Water research **32**.

Bertrand-Krajewski, J. L., S. Barraud, et al. (2008). "Mesurages en continu des flux polluants particuliers en réseaux d'assainissement urbains : enjeux, méthodes, exemple d'application." La Houille blanche(4): 49-57.

Brown, J., Ackerman, D., and Stein, E. (2012). "Continuous In Situ Characterization of Particulate Sizes in Urban Stormwater: Method Testing and Refinement." J. Environ. Eng., 138(6), 673–679.

Daly, E., A. Deletic, et al. (2012). "Modelling of stormwater biofilters under random hydrologic variability: a case study of a car park at Monash University, Victoria (Australia)." Hydrological Processes 26(22): 3416-3424.

Davis, A.P., Shokouhian, M., Sharma, H., Minami, C., (2001). Laboratory study of biological retention for urban stormwater management. Water Environment Research 73 (1), 5-14.

Hatt, B. E., T. D. Fletcher, et al. (2009). "Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale." Journal of Hydrology **365**(3-4): 310-321.

Kosugi, K. (2002). "Parametric Models." Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. SSSA Book Series, no. 5.

Laio, F. (2001). "Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress. II. Probabilistic soil moisture dynamics." Advances in water research **24**: 707-723.

Lamy, E., L. Lassabatere, et al. (2013). "Effect of a nonwoven geotextile on solute and colloid transport in porous media under both saturated and unsaturated conditions." Geotextiles and Geomembranes **36**: 55-65.

Le Coustumer, S., T. D. Fletcher, et al. (2009). "Hydraulic performance of biofilter systems for stormwater management: Influences of design and operation." Journal of Hydrology **376**(1-2): 16-23.

Le Coustumer, S., T. D. Fletcher, et al. (2012). "The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study." Water research **46**(20): 6743-6752.

Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media." Water resources research **12**: 513-522.

- Pagotto, C, Remy, N, Legret, M., Le Cloirec (2001) P. Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway. *Environmental technology* 22, 307-319
- Read, J., Wevill, T., Fletcher, T., Deletic, A., (2008). Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems. *Water Research* 42, 893-902.
- Sansalone, J. (2009). Field Testing Guidelines for Certification of Manufactured Stormwater BMPs: Part II. *World Environmental and Water Resources Congress 2009*. Great Rivers.
- Schaap, M. G. and M. T. van Genuchten (2006). "A Modified Mualem–van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation." *Vadose Zone Journal* 5(1): 27.
- Šimůnek, J., M. T. van Genuchten, et al. (2008). "Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes." *Vadose Zone Journal* 7(2): 587.
- Sohi, S. P., Krull, E. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105: (41-82)
- Trowsdale, S. A. and R. Simcock (2011). "Urban stormwater treatment using bioretention." *Journal of Hydrology* 397(3-4): 167-174.
- VanGenuchten, T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil sciences society of America Journal* 44: 892-898.
- Westerlund, C. and M. Viklander (2006). "Particles and associated metals in road runoff during snowmelt and rainfall." *Science of The Total Environment* 362(1-3): 143-156.

### **Thèses**

- Chebbo, G. (2011). Solides des rejets pluviaux urbains Caractérisation et traitabilité, Ecole des ponts et chaussées. **PhD**.
- Schneider, S. (2010). Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols à partir d'une modélisation inverse de données d'infiltration et de résistivité électrique, Université Paris-sud 11. **PhD**.
- Ugalde, J. M. S. (2003). Identification des paramètres hydrodynamiques du sol par modélisation inverse des flux d'infiltration : application aux échelles locale et hydrologique. *Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement*, Institut national polytechnique de Grenoble. **PhD**.

### **Support de cours**

- Bertrand-Krajewski, J.-L. (2006). Cours d'hydrologie urbaine. Partie 7 - Les Polluants des rejets urbains de temps de pluie, INSA Lyon.
- Bertrand-Krajewski, J.-L. (2007). Cours d'hydrologie urbaine. Partie 2 - La Pluie, INSA Lyon.

### **Logiciels**

- Simunek, J. (2011). HYDRUS2/3D 2.xx User Manual. PC-Progress.

## **10 Annexes**

### **10.1 Annexe 1**

Plan de la cuve de mesure

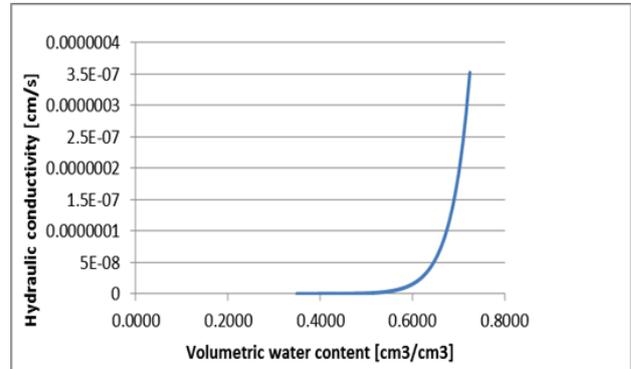
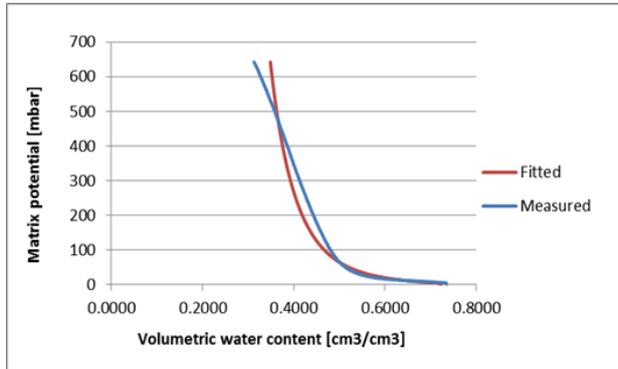
## **10.2 Annexe 2**

Plan de la cassette

### 10.3 Annexe 3

Courbe de rétention des substrats  $\theta(h)$  – mesurée et ajustée, et évolution de la conductivité hydraulique K avec  $\theta$ .

BC30%



BC50%

