

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

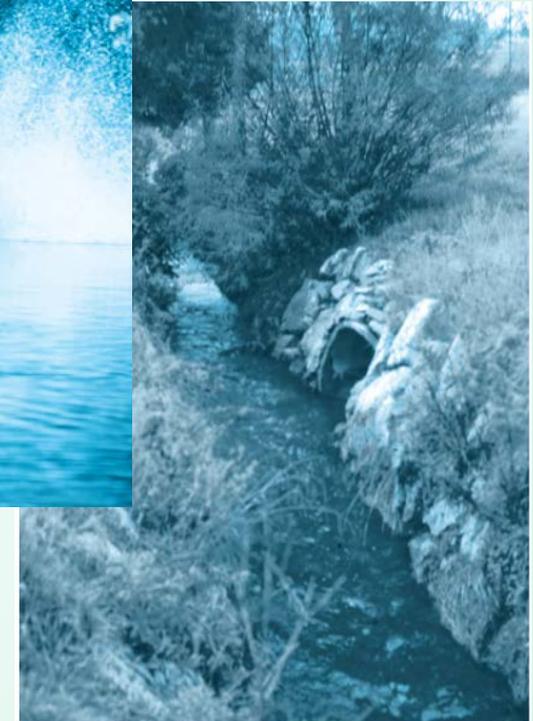
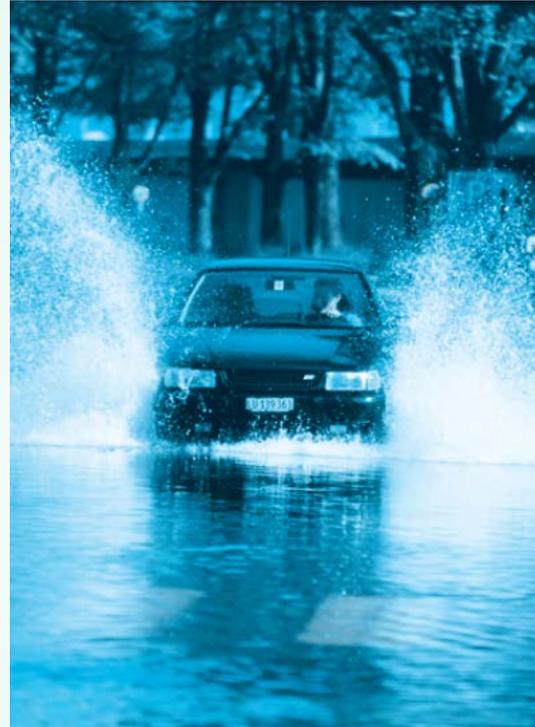
Sous la direction de
Prof. Fabienne Favre Boivin
Institut iTEC, Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg

Expert externe : M. René Brodmann



Présence de polluants dans les eaux de ruissellement des routes

Cadmium	Usure des pneus et des freins
Plomb	Carburant et usure des pneus
Zinc	Carburant, usure des routes et fuites
Cuivre	Lignes de contact et freins
Azote (ammonium, nitrate)	Liquides de dégivrage, engrais, retombées atmosphériques
HAP	Résidus de carburant, fuites, créosote
Herbicides	Applications pour éliminer la végétation



OFEV 2002

- Dépassement fréquent des concentrations maximales admises par l'OEaux dans les cours d'eau et lacs

Directive VSA 2002 Evacuation des eaux pluviales

Ordre de priorité – l'option à choisir dépend de la faisabilité locale et de l'admissibilité légale:

- 1) Infiltration dans le sol
- 2) Déversement dans des eaux superficielles
- 3) Déversement dans les égouts publics du système unitaire

Solution actuellement appliquée sur le site devant accueillir l'installation-test:

→ déversement dans la rivière sans prétraitement.

Estimation basée sur le trafic moyen journalier (18000 véhicules par jour):

→ eau fortement polluée!

Estimation d'admissibilité du déversement (prend en compte la concentration des polluants et les volumes rejetés, mais aussi les caractéristiques hydrologiques et écologiques du cours d'eau récepteur):

→ **déversement admissible uniquement après traitement préalable**



Choix de type d'installation – caractéristiques de la pollution

- Pollution fixée sur les particules solides (Viau 2010)

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

- Granulométrie moyenne des matières en suspension (MES) issues des eaux de ruissellement (Viau 2010)

<i>Nature réseau</i>	<i>D₁₀</i>	<i>D₅₀</i>	<i>D₉₀</i>	<i>% < 100 µm</i>
<i>Pluvial</i>	7.4 µm	35 µm	617 µm	81
<i>Unitaire</i>	6.8 µm	34 µm	331 µm	75

- Masse volumique (g/cm³) des MES dans les eaux pluviales urbaines (Viau 2010)

Particules < 100 µm 2.6

Particules >100 µm 1.4-1.7

- Une association de décantation et de filtration devrait permettre une bonne rétention de la pollution des eaux pluviales routières



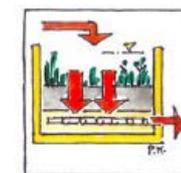
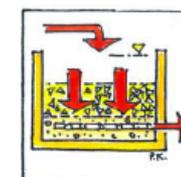
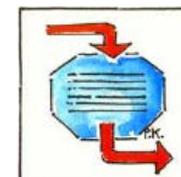
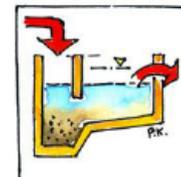
Choix de type d'installation – solutions envisageables

Type d'installation	% élimination MES	Élimination métaux lourds	Élimination de la pollution dissoute (N, P, Corg)
Décanteur	30	-	-
Séparateur lamellaire	50	-	-
Filtre à tissus pelucheux	80	+ -	-
Filtre à gravier	90	+ -	-
Filtre à sable	>90	++	-
Filtre végétalisé	>90	++	+

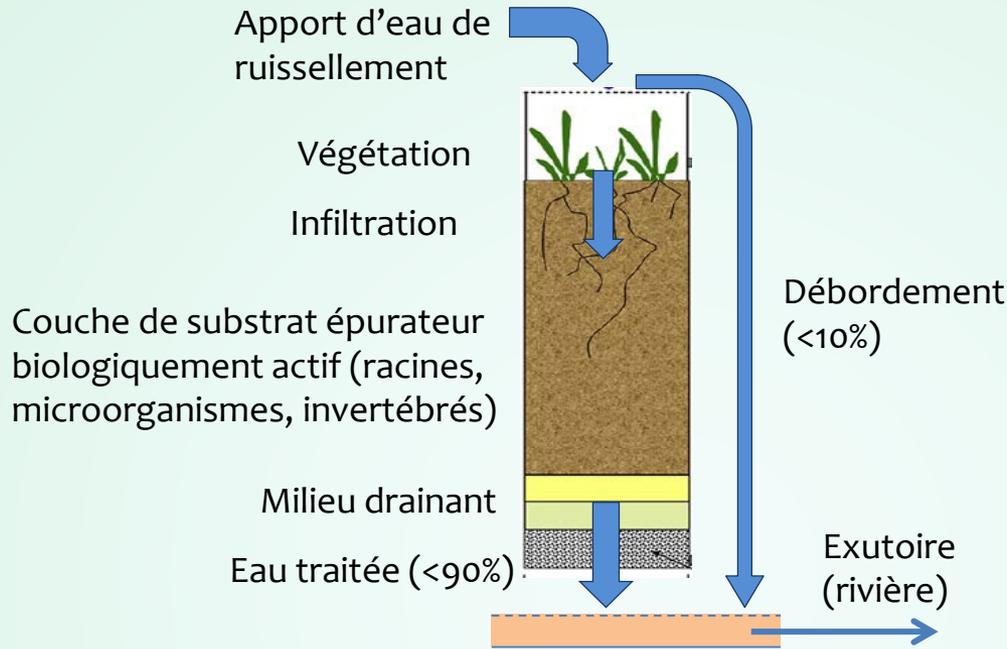
Désavantage du filtre végétalisé: perméabilité faible, donc rendement hydraulique relativement bas

Directive OFROU/ASTRA 18005 (2013)

- Capacité hydraulique à atteindre: **90% du volume annuel total ruisselé** doit pouvoir transiter par le substrat – être traité (OFROU 2013).
- Capacité de traitement à atteindre: un abattement de 90% devrait être réalisé sur les matières en suspension (respect du niveau d'exigences «élevé» selon OFROU 2013).



Filtre végétalisé – principe de fonctionnement et choix du substrat



Composants du substrat (Hepia) – utilisation de déchets verts:

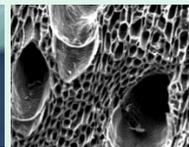


Compost de ferme: nutriments pour les végétaux et activité biologique



+

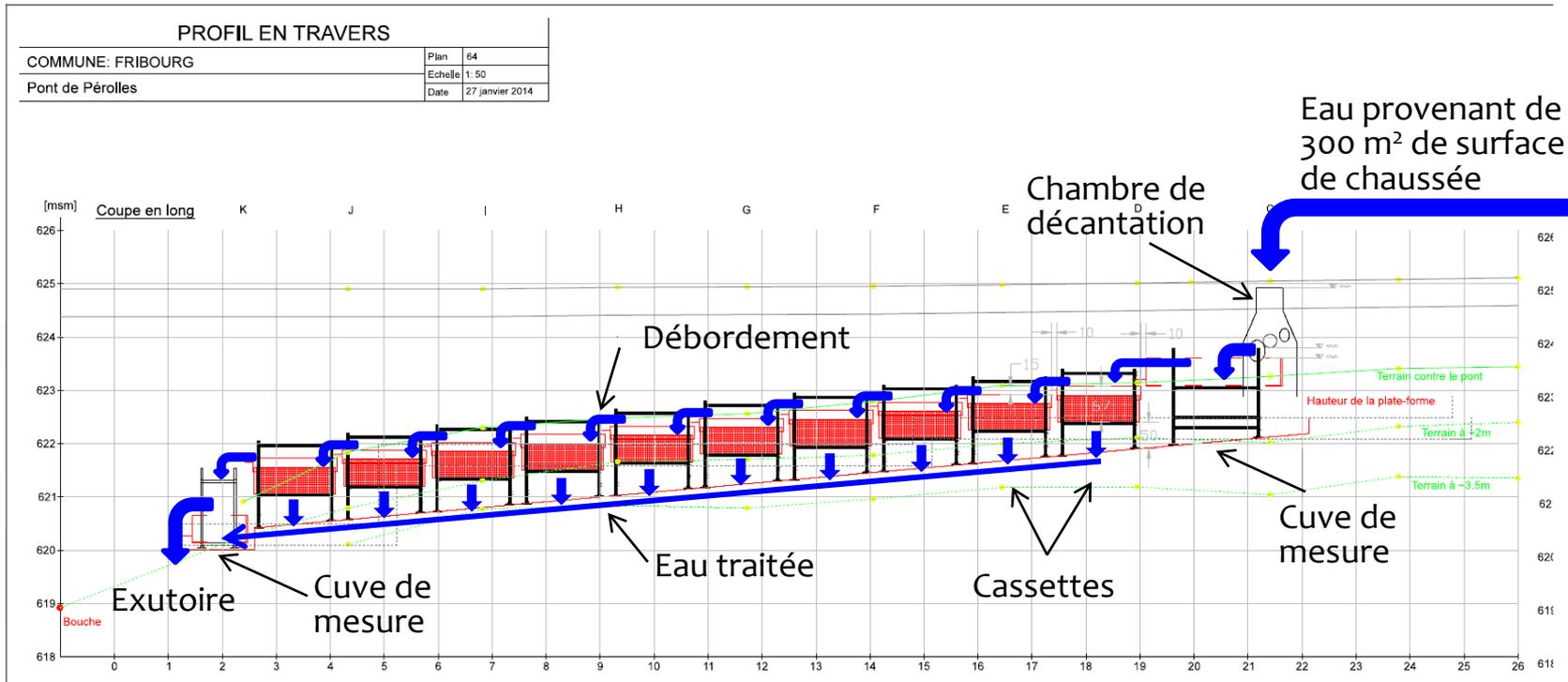
Biochar: capacité d'adsorption de polluants et augmentation de la conductivité hydrique



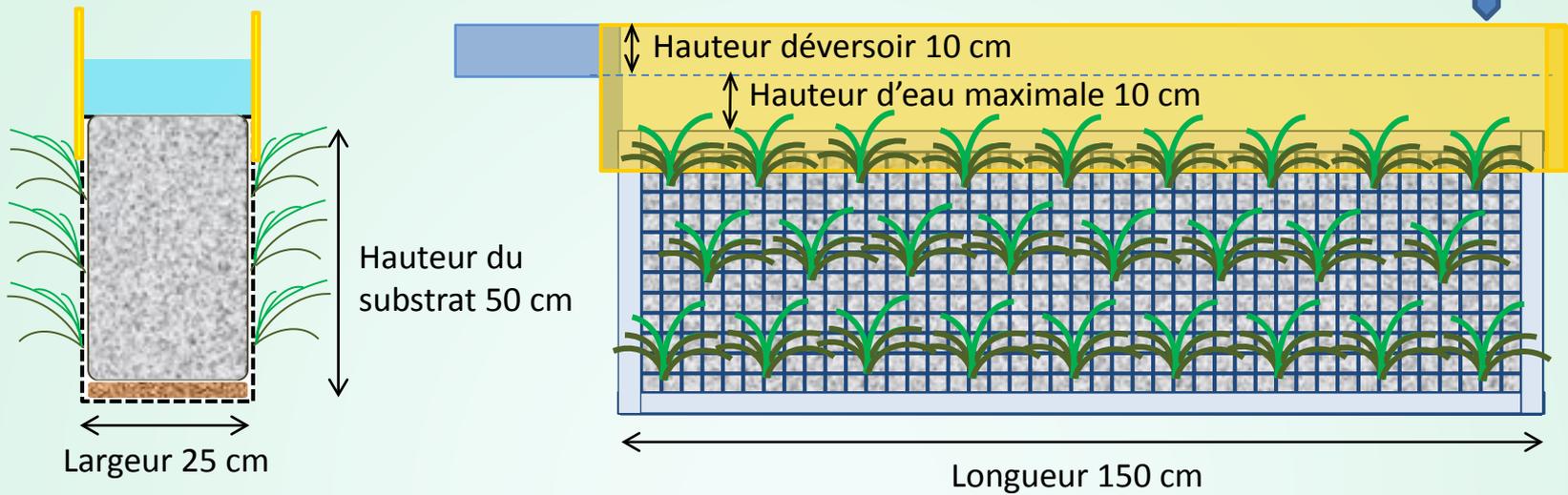
Conception du système et installation prévu sur le terrain

Dimensions du bassin versant: 25 m de longueur de route * 12 m de largeur – 300 m² de chaussée

Espace disponible pour l'installation du système: environ 20 m x 2 m (permet l'installation d'environ 10 cassettes)



Conception d'un module de traitement (cassette)



Remplissage et végétalisation



Installation de la couronne d'étanchéité

Objectifs de l'étude

- 1) **La conception des cassettes est-elle adaptée pour le traitement des eaux de ruissellement en conditions de terrain?**
 - Caractéristiques de modules unitaires (cassettes) pour deux substrats à teneur en biochar différente (30 et 50%):
 - Capacité hydraulique d'une cassette (débit de débordement)
 - Dynamique et distribution des écoulements

- 2) **De quelle façon le système envisagé (10 cassettes en cascade) se comporte-t-il au cours d'une année d'utilisation?**
 - Modélisation de la répartition des écoulements sur les cassettes en fonction des conditions météorologiques et des quantités de polluants attendues:
 - Volume annuel traité par le système
 - Conditions hydriques auxquelles les végétaux sont exposés



Pré-étude: analyse des conditions hydrologiques et polluatives attendues

VSA 2002 Evac. eaux pluviales	
Valeurs moyennes charge TSS (mg/l)	240
Emission poussières rte princ. 18000 véh/j (kg MS /ha*an)	6000
Surface BV (m ²)	300
Emission poussières rte princ. 18000 véh/j BV (kg MS/an)	180
Volume total annuel pluie (moyenne 20 ans) (mm/an)	1000
Volume total annuel pluie (moyenne 20 ans) sur surface BV (l/an)	300000
Charge moyenne (mg/l)	600

+/- 100

Mesures Pully (15000 véh/j)	
TSS (mg/l)	
MIN	1
Q1	33.3
MEDIANE	72.8
Q3	139
MAX	676.3



Données disponibles sur le substrat

Mesures effectués en laboratoire (Hepia) caractérisant les deux substrats d'un point de vue hydrodynamique :

- Evolution du potentiel hydrique h en fonction de la teneur volumique en eau du substrat (θ)
- Conductivité hydraulique à saturation K_s



Montage au laboratoire: système d'écoulement comprenant la cuve de mesure et la cassette



Cuve de mesure:

- Limnimètre
- Turbidimètre
- Tranquillisation
- Sédimentation > 200 μm

Une cassette testée à la fois

Deux cassettes testées, 30 et 50% de biochar

Objectifs :

- Ecoulements préférentiels, affouillement, perte substrat?
- Répartition de l'eau à travers le substrat avec et sans système de distribution
- Débit de débordement (10 cm charge)
- Conductivité hydraulique «effective»
- Temps humectation substrat

Montage au laboratoire: système d'écoulement comprenant la cuve de mesure et la cassette

Fuite de substrat (flottaison) – une grille de rétention est nécessaire



Affouillement et distribution irrégulière des petits débits – proposition d'un système de distribution de l'eau: tuyau PVC à fentes coupé longitudinalement avec canal perforé pour la distribution des débits faibles



Estimation de la conductivité hydraulique «effective» pour une hauteur d'eau maximale (limite de débordement) et du débit entrant correspondant

Cassette BC30%			Conductivité à saturation K_s 276 mm/h			
Surface substrat		Charge Δh	Hauteur substrat		$K(10cm) =$	$K(10cm)$
$S [m^2]$	$Q [m^3/s]$	$[m]$	$L [m]$	$Q/(((\Delta h+L)/L)*S) [m/s]$	$[mm/h]$	$[mm/10 min]$
0.3	0.00021	0.1	0.5	0.000648	2333.33	388.89

Cassette BC50%			Conductivité à saturation K_s 1140 mm/h			
Surface substrat		Charge Δh	Hauteur substrat		$K(10cm) =$	$K(10cm)$
$S [m^2]$	$Q [m^3/s]$	$[m]$	$L [m]$	$Q/(((\Delta h+L)/L)*S) [m/s]$	$[mm/h]$	$[mm/10 min]$
0.3	0.00005	0.1	0.5	0.000154	555.56	92.59

- Pour le substrat BC 30%, le débit de débordement correspond à un évènement d'environ 0.5 mm/10 min sur le bassin versant, et pour le substrat BC 50% à un évènement d'environ 0.1 mm/10 min.



Temps d'humectation du substrat et répartition des écoulements

Points à déterminer:

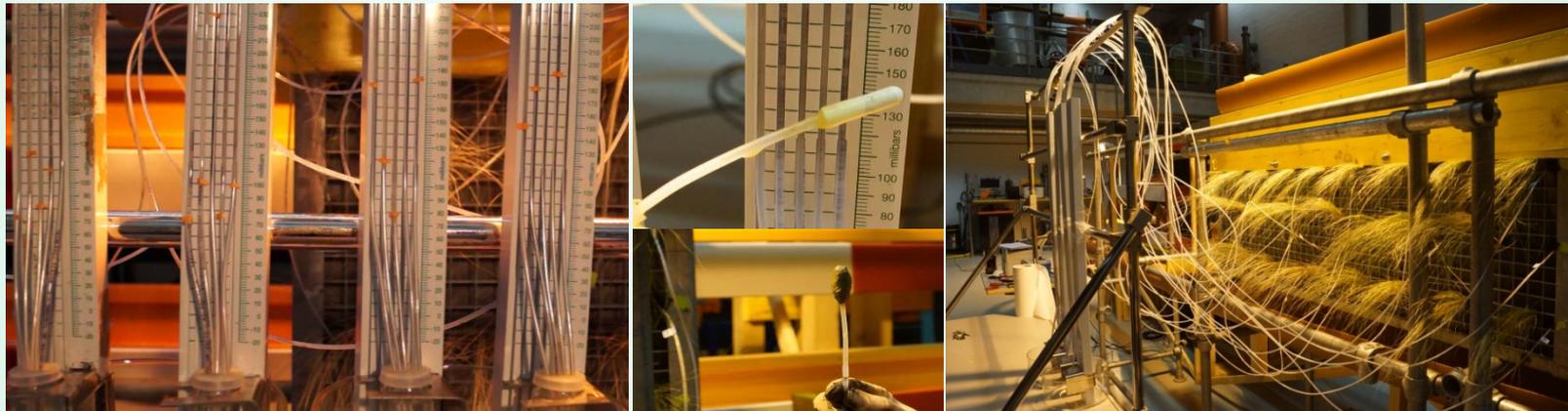
- Comment se fait la répartition des écoulements avec et sans système de distribution pour un débit standard (avec charge) et un débit faible (sans charge) ?
- En combien de temps le substrat est-il humecté (atteint-il la capacité de rétention) ?

Simulation Hydrus 2D:

2 débits, un débit faible sans mise en charge et un débit avec mise en charge
2 configurations, avec et sans système de distribution
2 substrats, 30 et 50% de biochar

Mesures par suivi potentiométrique:

30% biochar
Canal de distribution
2 débits



Simulations des écoulements sur le logiciel Hydrus 2D – ajustement du modèle

Détermination des coefficients de la relation Van Genuchten-Mualem à partir des données expérimentales:

Teneur volumique en eau en fonction du potentiel hydrique du substrat

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

Saturation effective:

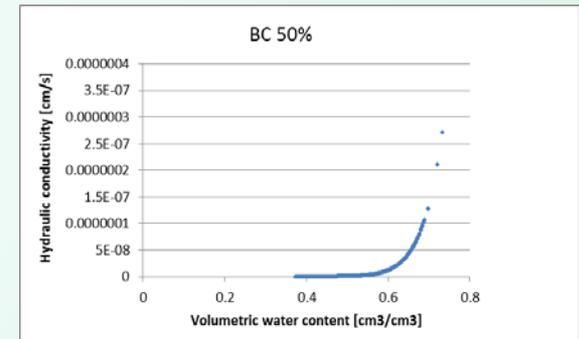
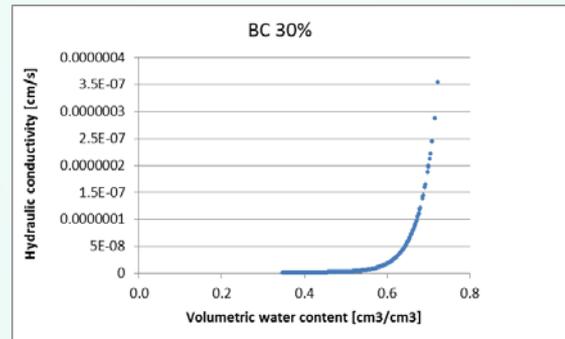
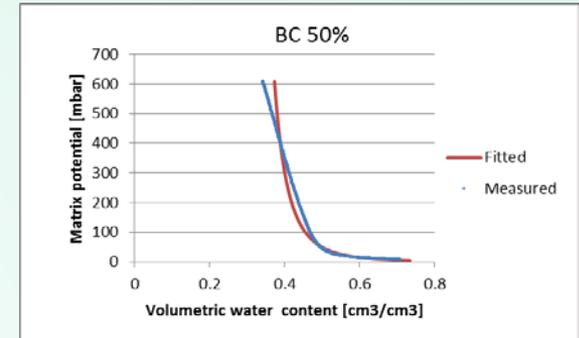
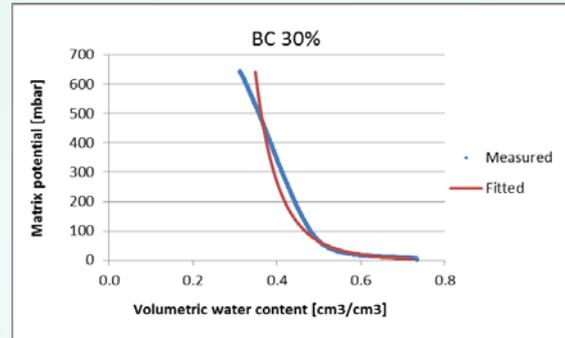
$$S_e = \frac{\Theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Conductivité hydraulique relative

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

Conductivité hydraulique

$$K(\Theta) = K_s \times K_r$$



$\theta_r = 0.023$ $\alpha = 0.322$ $K_s = 276$ mm/h
 $\theta_s = 0.824$ $n = 1.169$

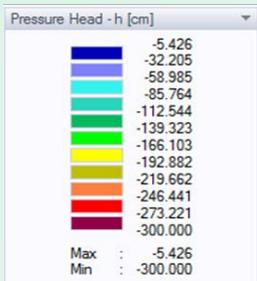
$\theta_r = 0.252$ $\alpha = 0.918$ $K_s = 1140$ mm/h
 $\theta_s = 0.999$ $n = 1.288$

Les paramètres θ_r , θ_s , α 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.

La conductivité hydrique à saturation est mesurée en laboratoire sur colonne.

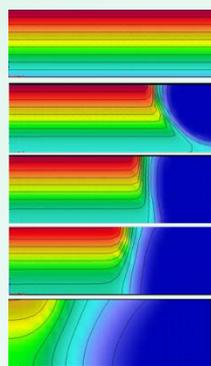
Simulations des écoulements sur le logiciel Hydrus 2D – résultats

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



Cassette
BC30%

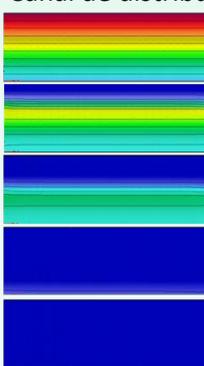
Tête de cassette



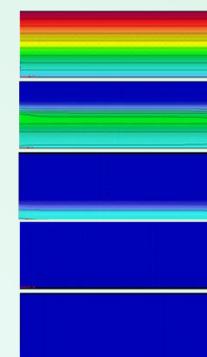
50 cm

Débit sans charge (0.05 l/s)

Canal de distribution



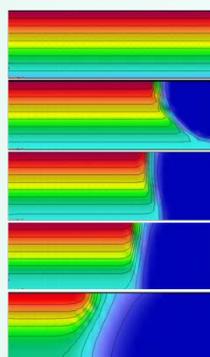
Canal de distribution



Débit avec charge (0.1 l/s)

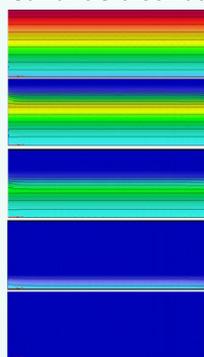
Cassette
BC50%

Tête de cassette

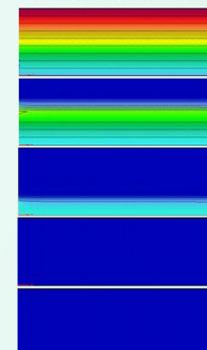


Débit sans charge (0.05 l/s)

Canal de distribution



Canal de distribution



Débit avec charge (0.1 l/s)

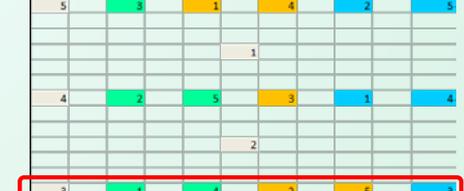
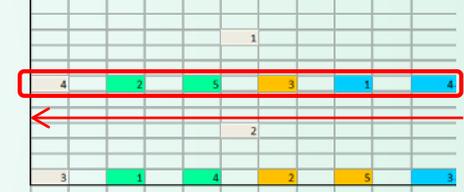
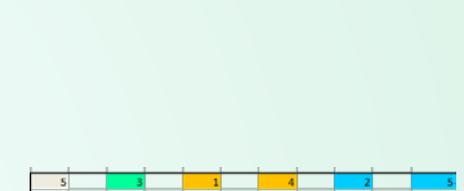
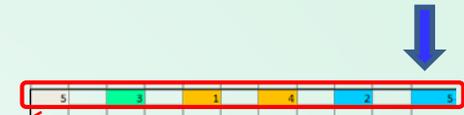
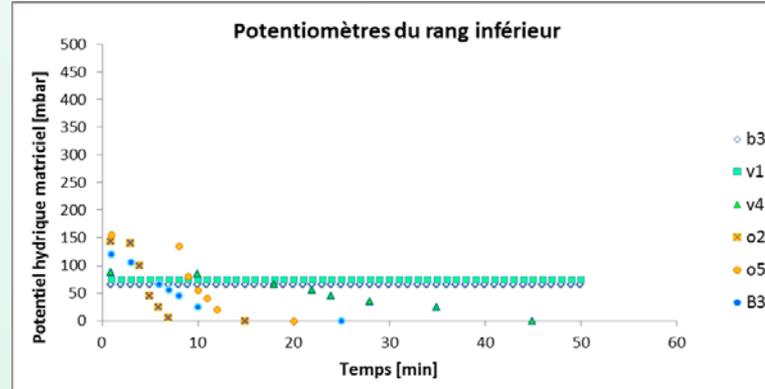
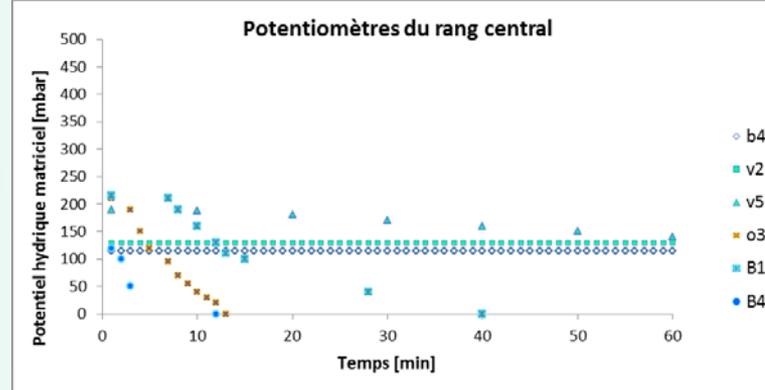
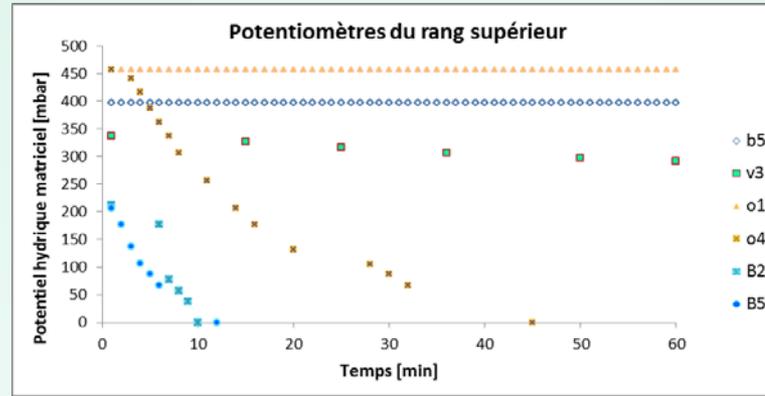
Informations essentielles obtenues:

- Nécessité d'une distribution homogène pour débits faibles (sans mise en charge)
- Le temps pour atteindre le taux d'humidité correspondant à la capacité de rétention est court (pour les débits < 0.1 l/s, correspondant à l'intensité de l'évènement minimal mesuré) : 5 min.

Evolution du bulbe d'humectation par suivi potentiométrique - résultats

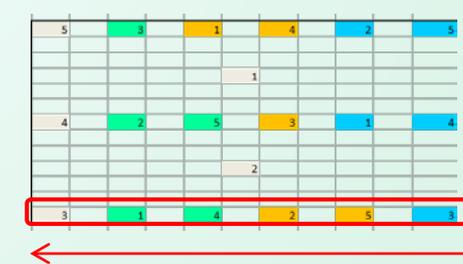
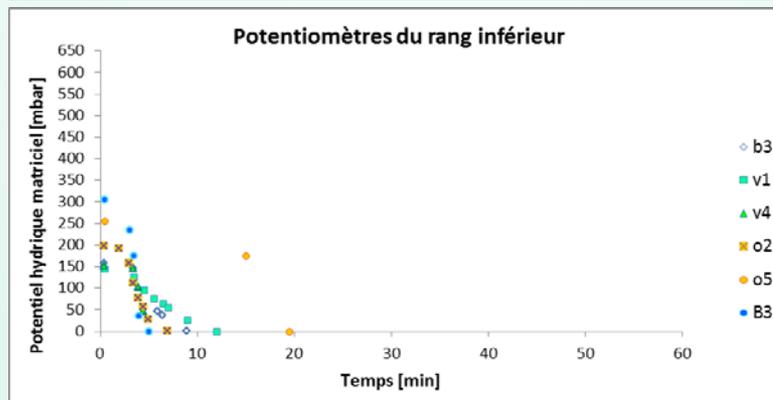
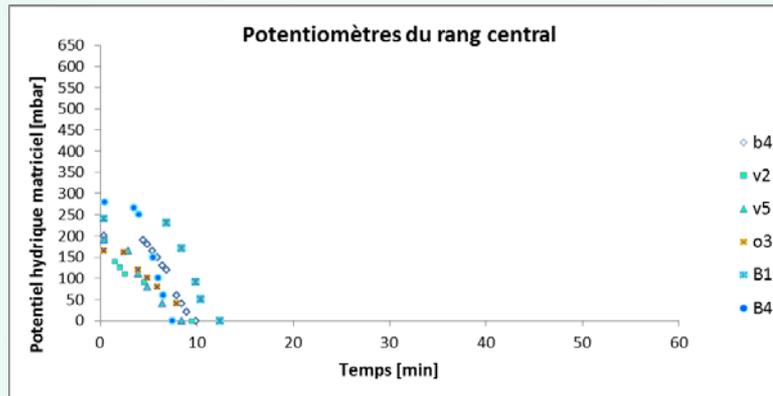
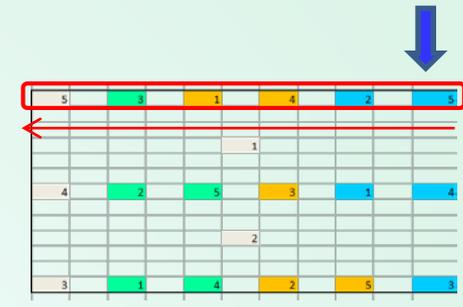
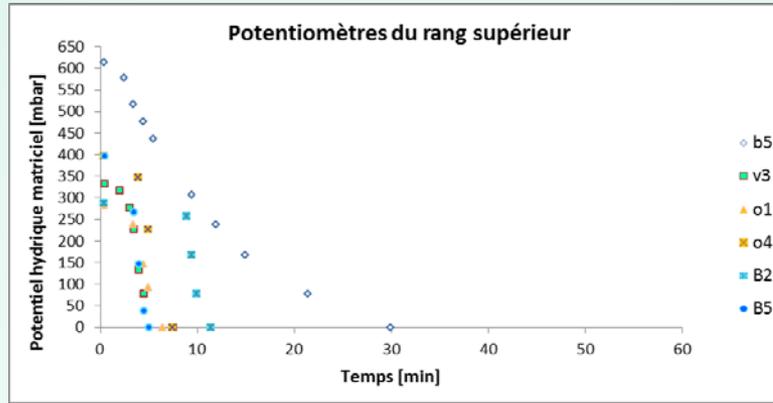
BC 30%, test avec système de distribution, débit 0.05 l/s (pas de mise en charge):

(La distribution homogène n'a pas pu être réalisée avec le système disponible)



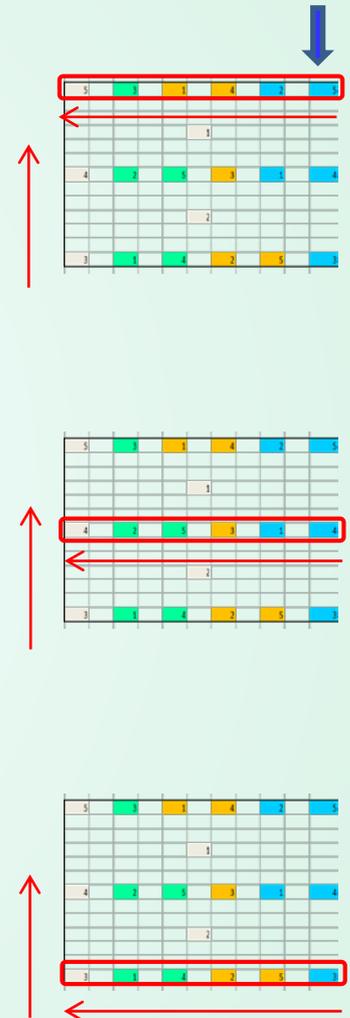
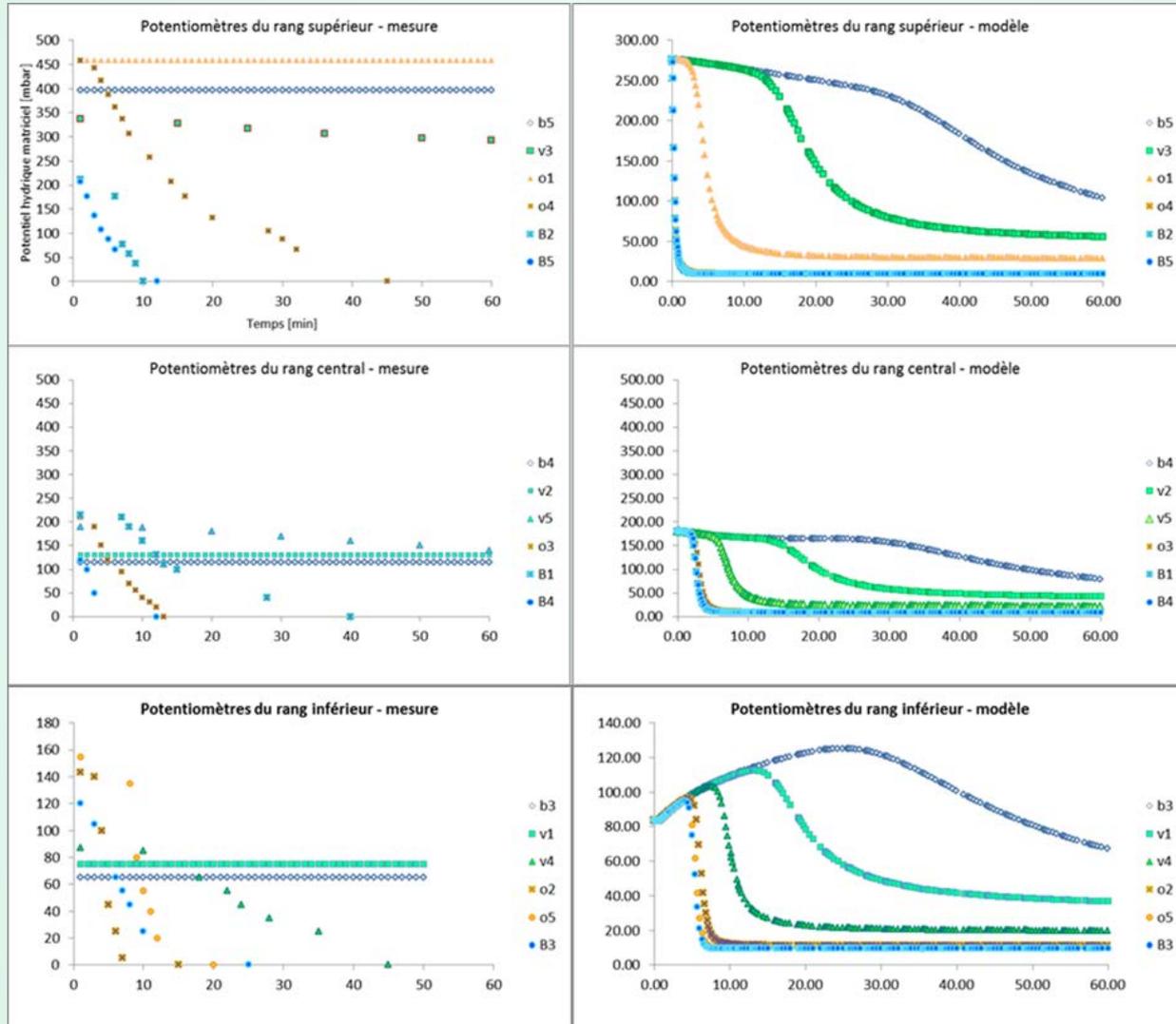
Evolution du bulbe d'humectation par suivi potentiométrique - résultats

BC 30%, test avec système de distribution, débit 0.1 l/s (mise en charge)



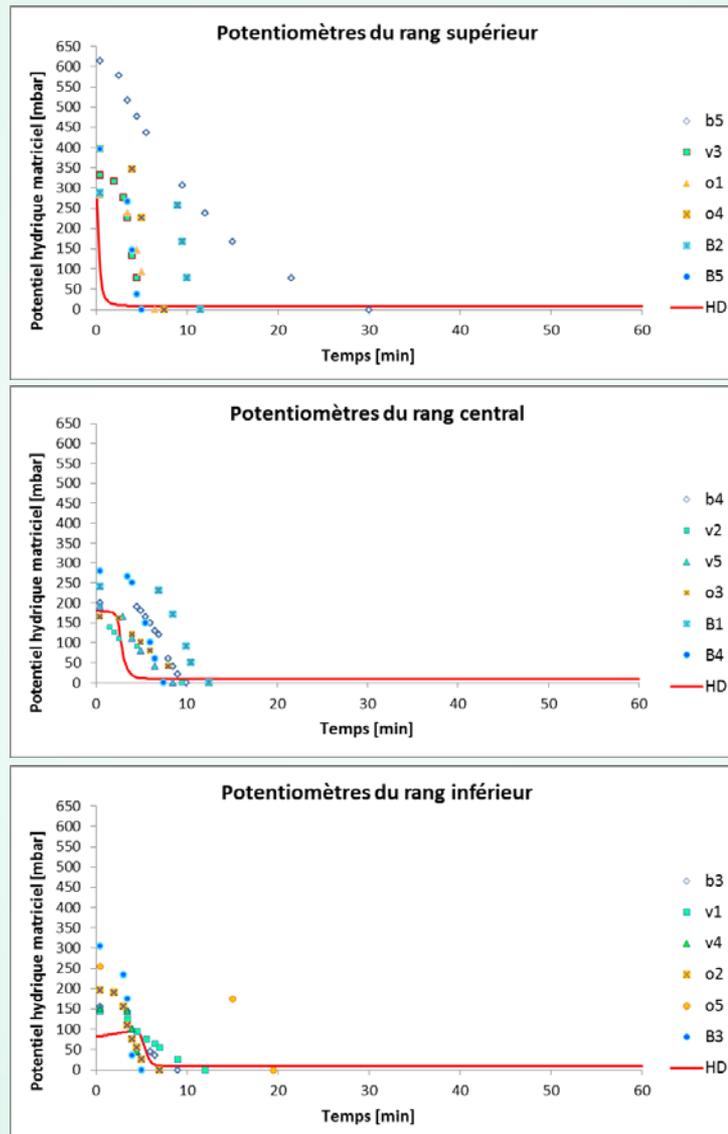
Comparaison mesures-simulation

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



Comparaison mesures-simulation

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



Modèle de distribution des flux sur les cassettes - objectifs et démarche

- Détermination du nombre de cassettes nécessaires pour traiter 90% du volume annuel
- Détermination des conditions hydriques auxquelles les plantes seront exposées

Distribution des flux – sur la base de l'année synthétiques (volumes journaliers moyens par débit 1993-2012)

Pour la première cassette :

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

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

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

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

Cassettes suivantes :

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

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

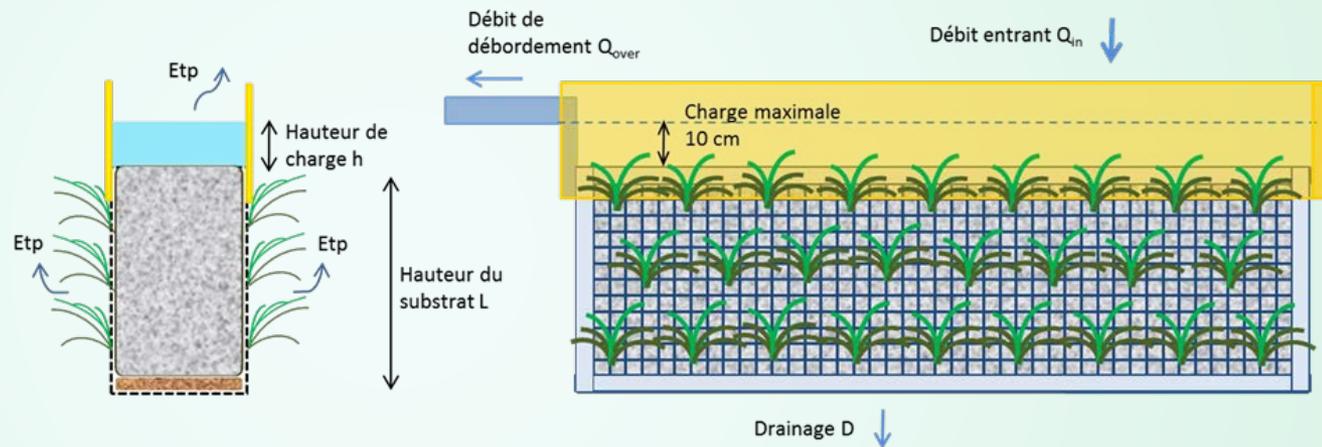
$$\rightarrow Q_{over}(C_n) = 0$$

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

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

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

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



Réserve maximale = capacité de rétention du substrat (θ_{cr})

Bilans hydriques

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

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

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

Modèle de distribution des flux sans prise en compte du colmatage - résultats

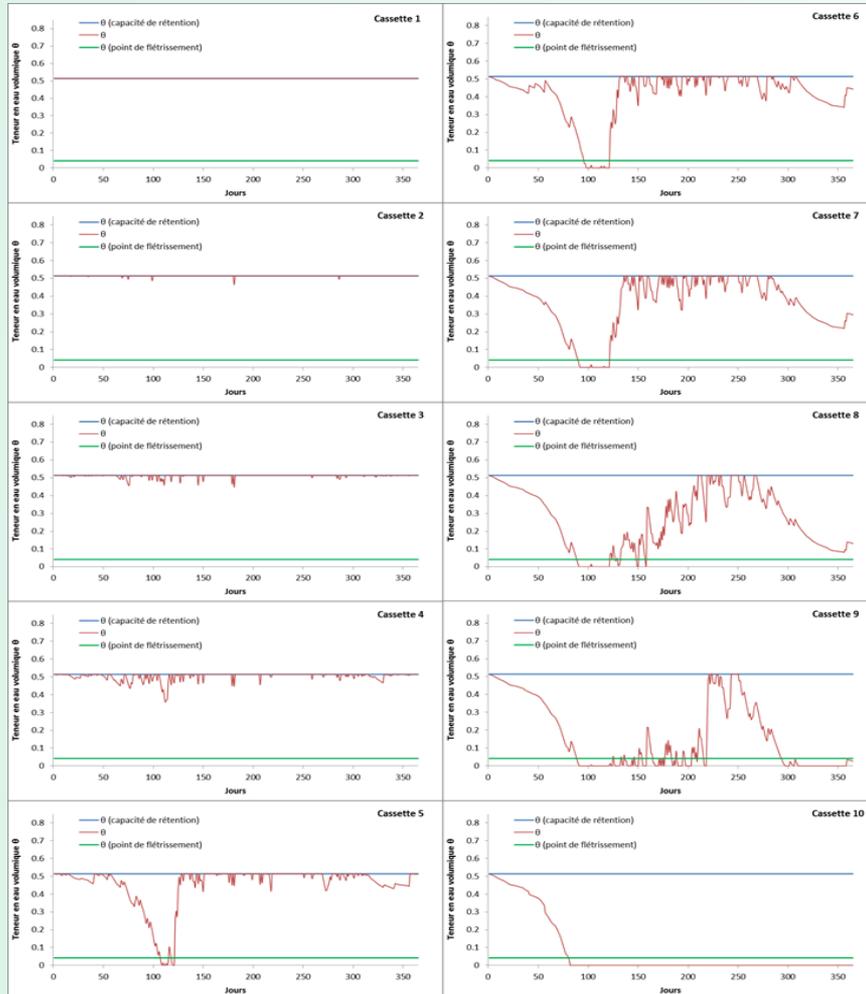
Conductivité hydrique effective considérée constante

→ Pourcentage du volume annuel traité

→ Evolution de la teneur en eau du substrat – périodes en dessous du point de flétrissement permanent ($5\% \theta_s$)

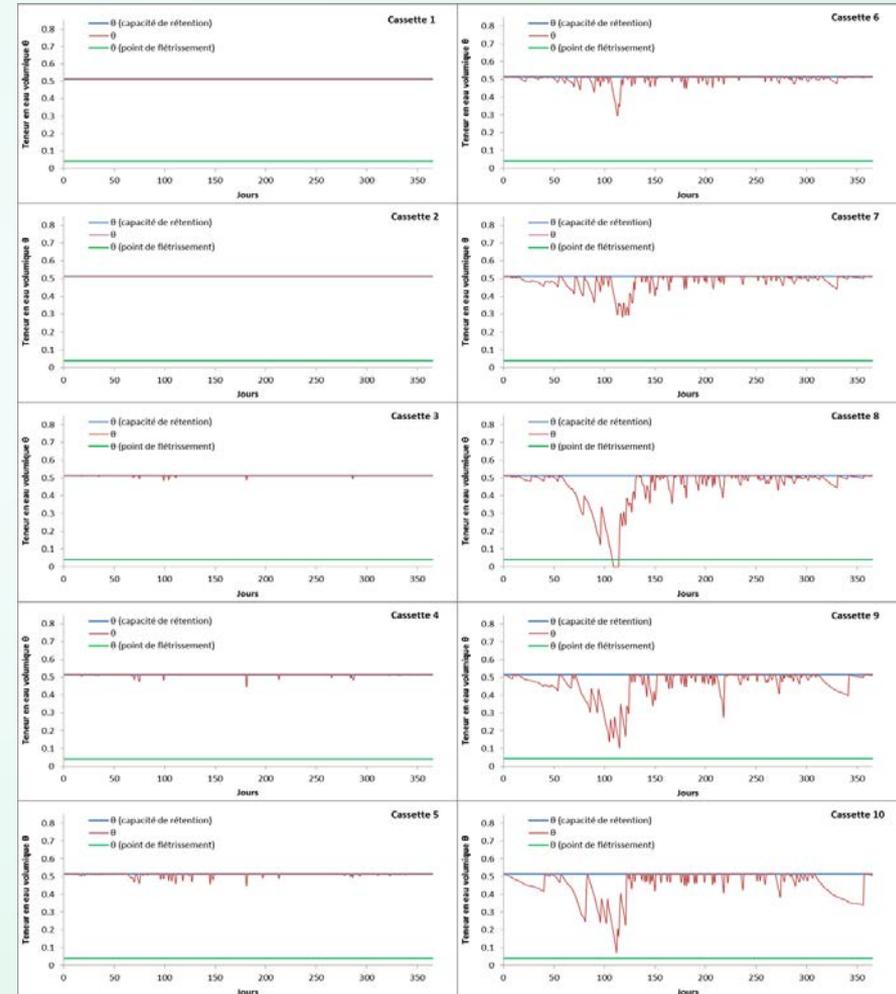
10 cassettes BC30% : $K = 389 \text{ mm/10min}$

Pourcentage de volume annuel traité: 96.6%



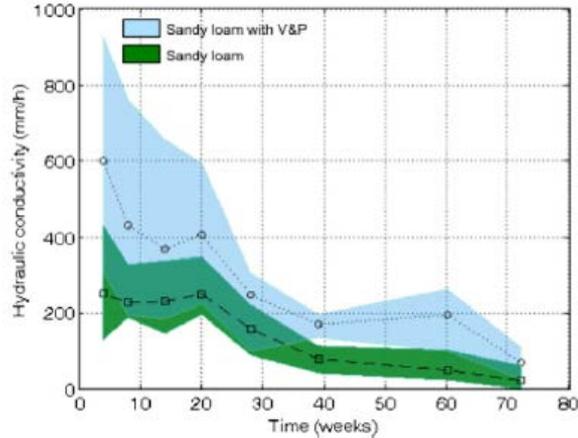
10 cassettes BC50% : $K = 93 \text{ mm/10min}$

Pourcentage de volume annuel traité: 96.6%

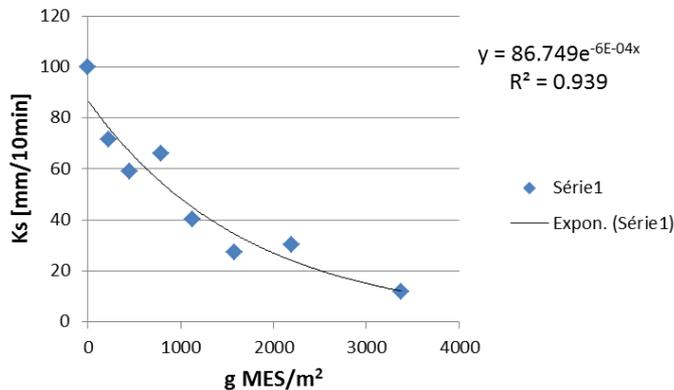


Estimation de l'évolution de la conductivité hydraulique en fonction de la quantité de MES déposée

L'évolution du K en fonction de la quantité de sédiments déposés sur la cassette est estimée à partir des résultats de Le Coustumer et al. 2012 (étude de l'influence des paramètres de conception de biofiltres sur le colmatage):



Sur des substrats (plus au moins comparables au mélange de compost et biochar), des apports réguliers d'eau contenant une concentration de sédiments constante ont été réalisés jusqu'à atteindre la charge annuelle moyenne: l'évolution de la conductivité hydraulique a été suivie.



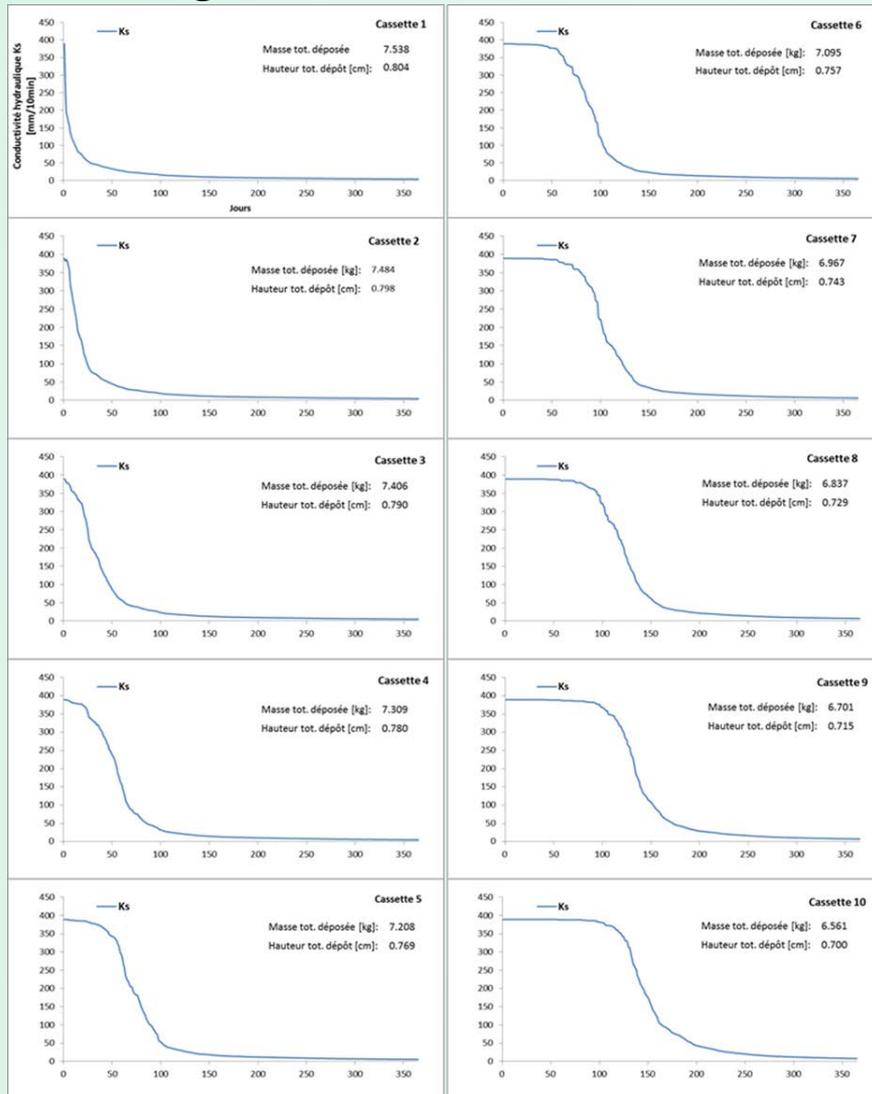
$$MES_d \left[\frac{g}{m^2} \right] = Conc(MES) \left[\frac{g}{m^3} \right] \times Volume\ drainé\ cumulé [m^3] / S [m^2]$$

$$K = K_{init} \times e^{(-0.0006 MES_d)} [mm/10min]$$

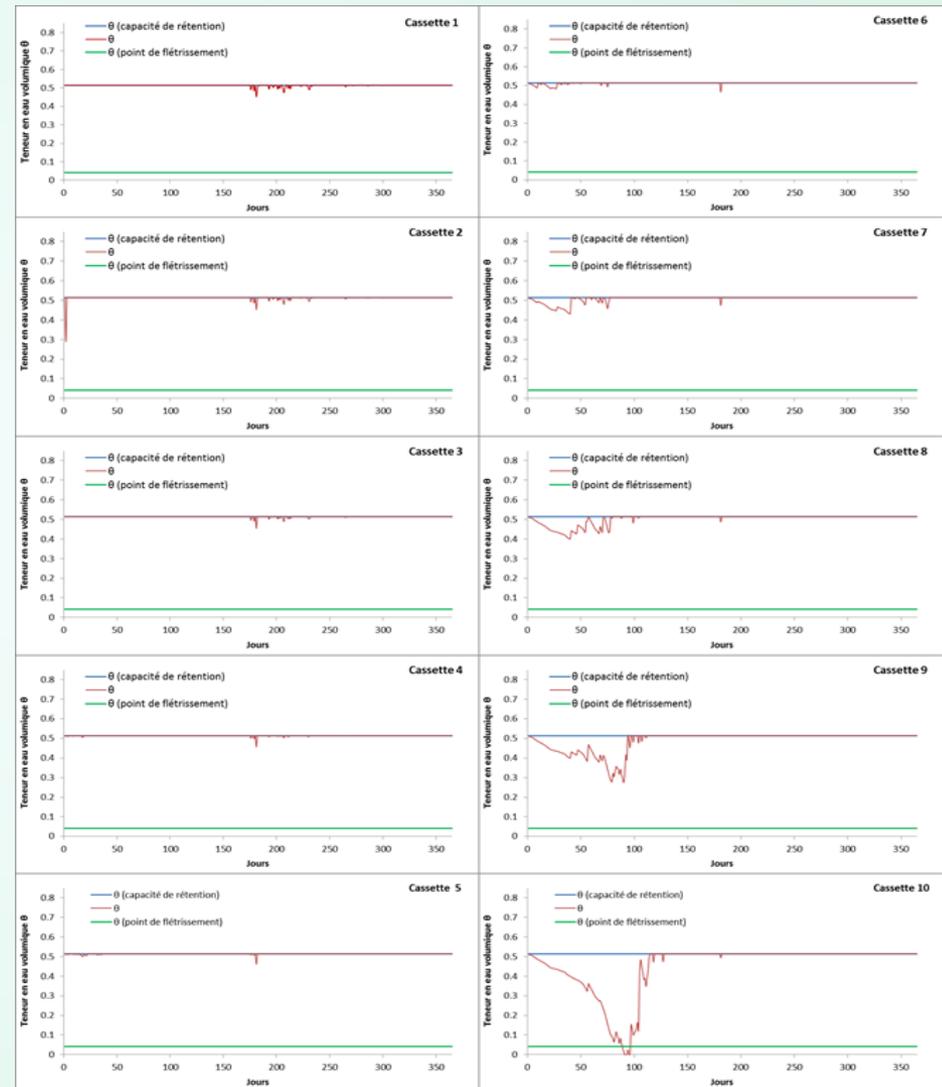
Modèle de distribution des flux avec prise en compte du colmatage - résultats

10 cassettes BC30% : K initial = 389 mm/10min
 Pourcentage de volume annuel traité 54.4%

[MES] = 150 g/m³



Evolution de la conductivité hydrique

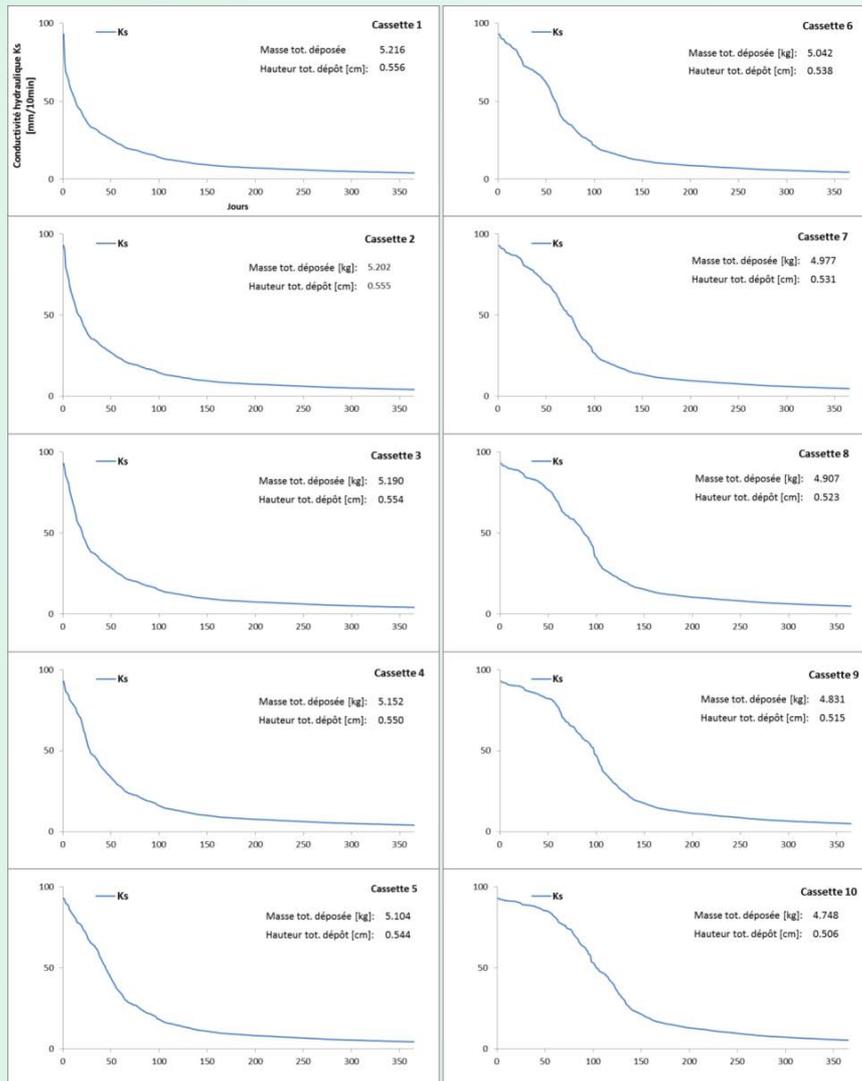


Evolution de la réserve en eau des cassettes

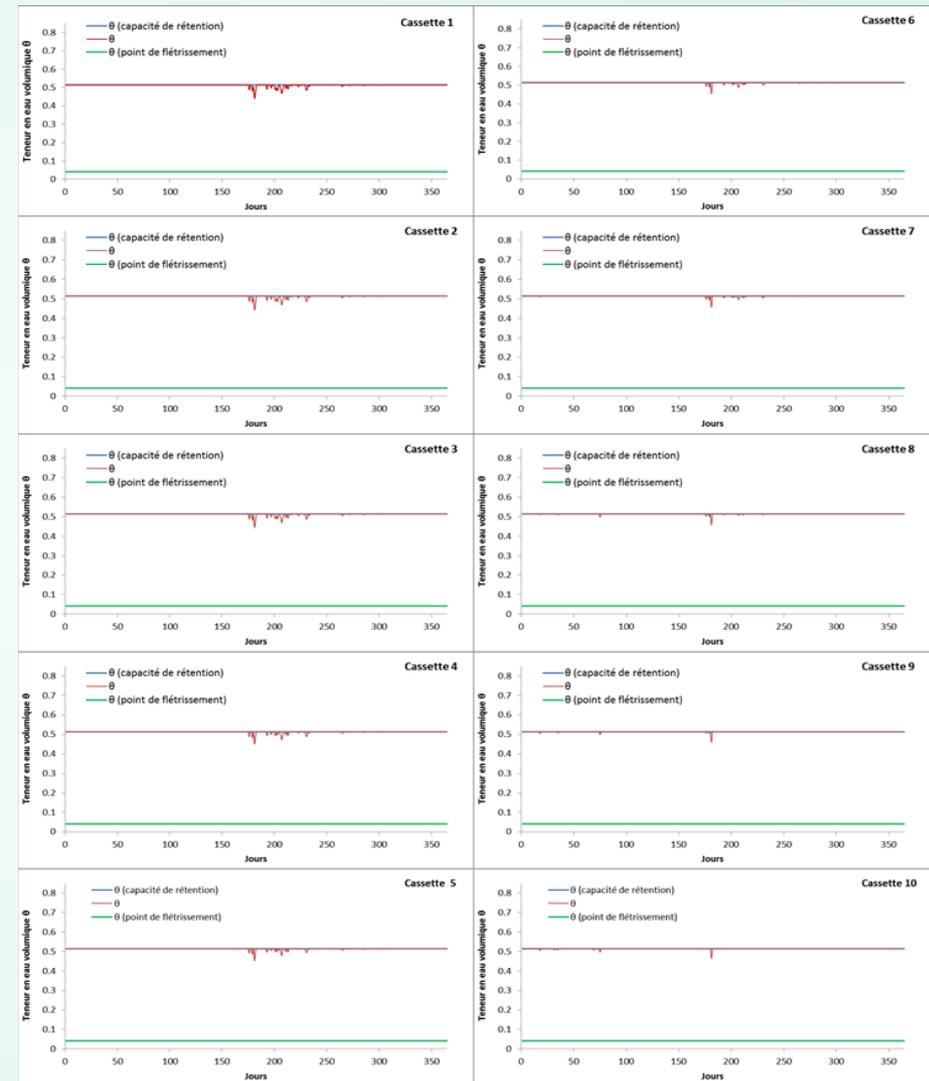
Modèle de distribution des flux avec prise en compte du colmatage - résultats

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

[MES] = 150 g/m³



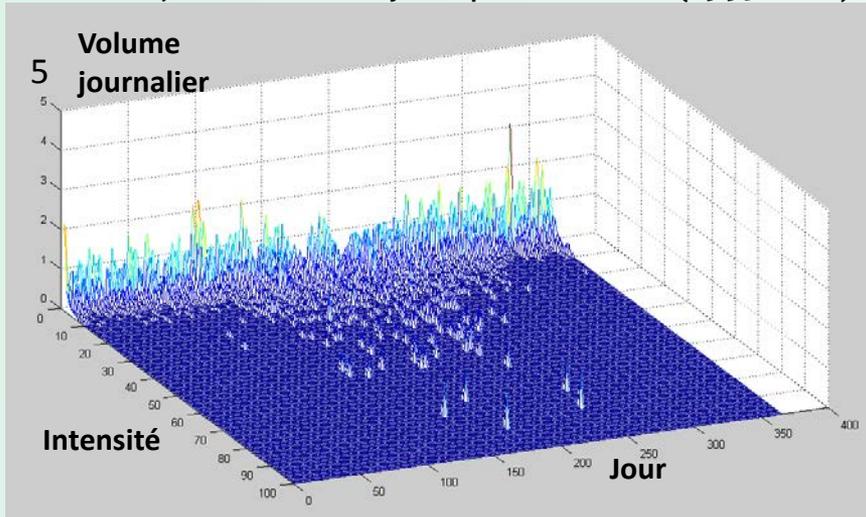
Evolution de la conductivité hydrique



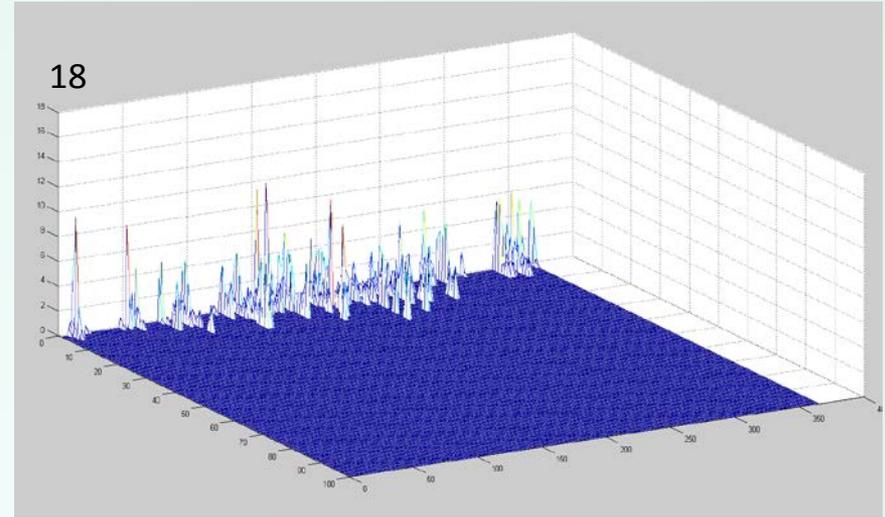
Evolution de la réserve en eau des cassettes

Année synthétique – volumes journaliers par intensité – comparaison avec années réelles

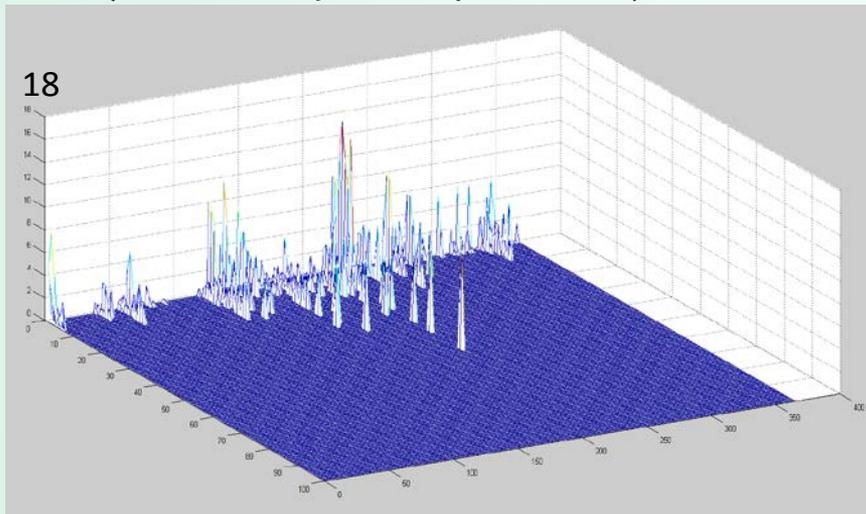
Volumes journaliers moyens par intensité (1993-2012)



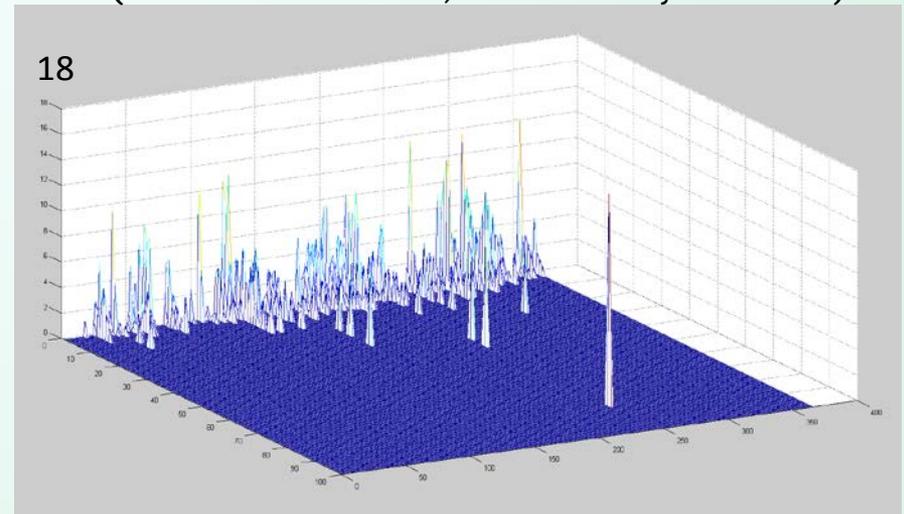
2011 (volume annuel minimum)



2007 (intensité moyenne la plus élevée)



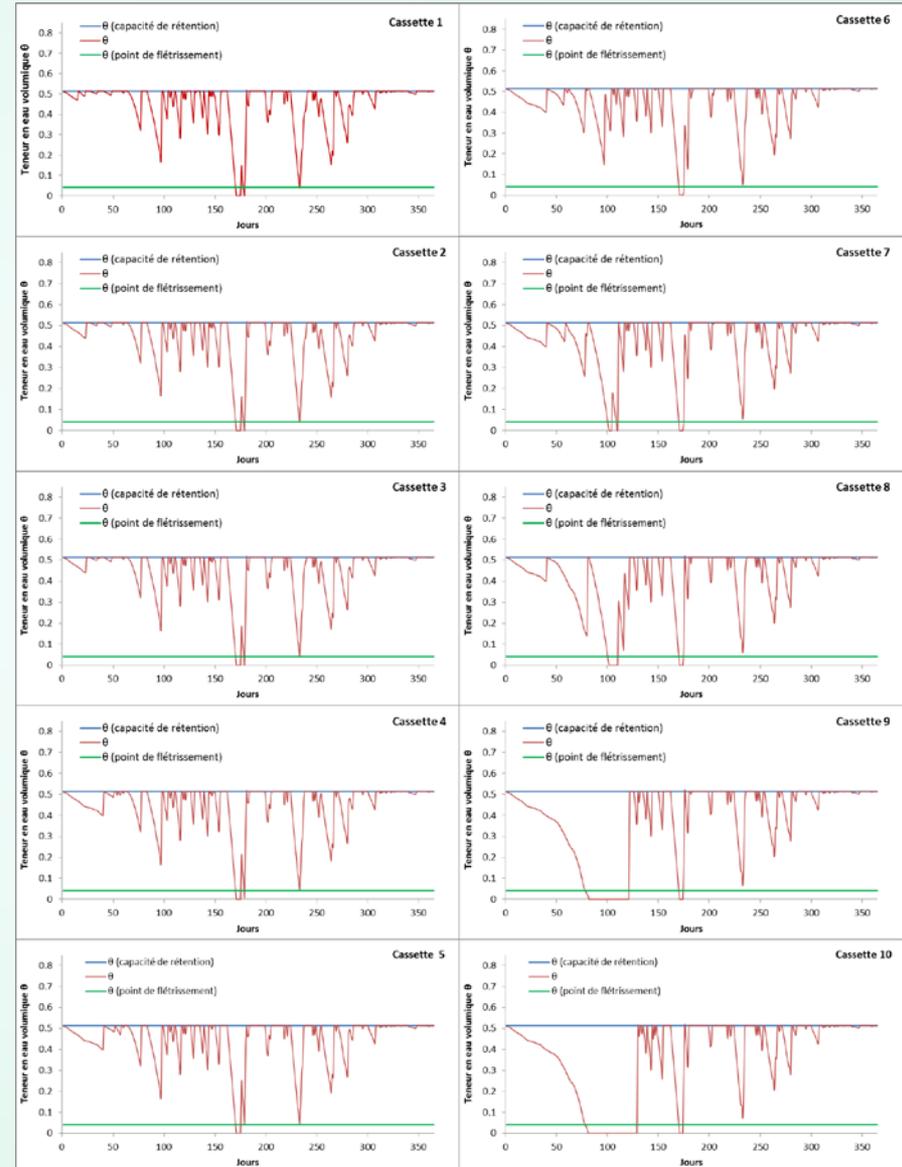
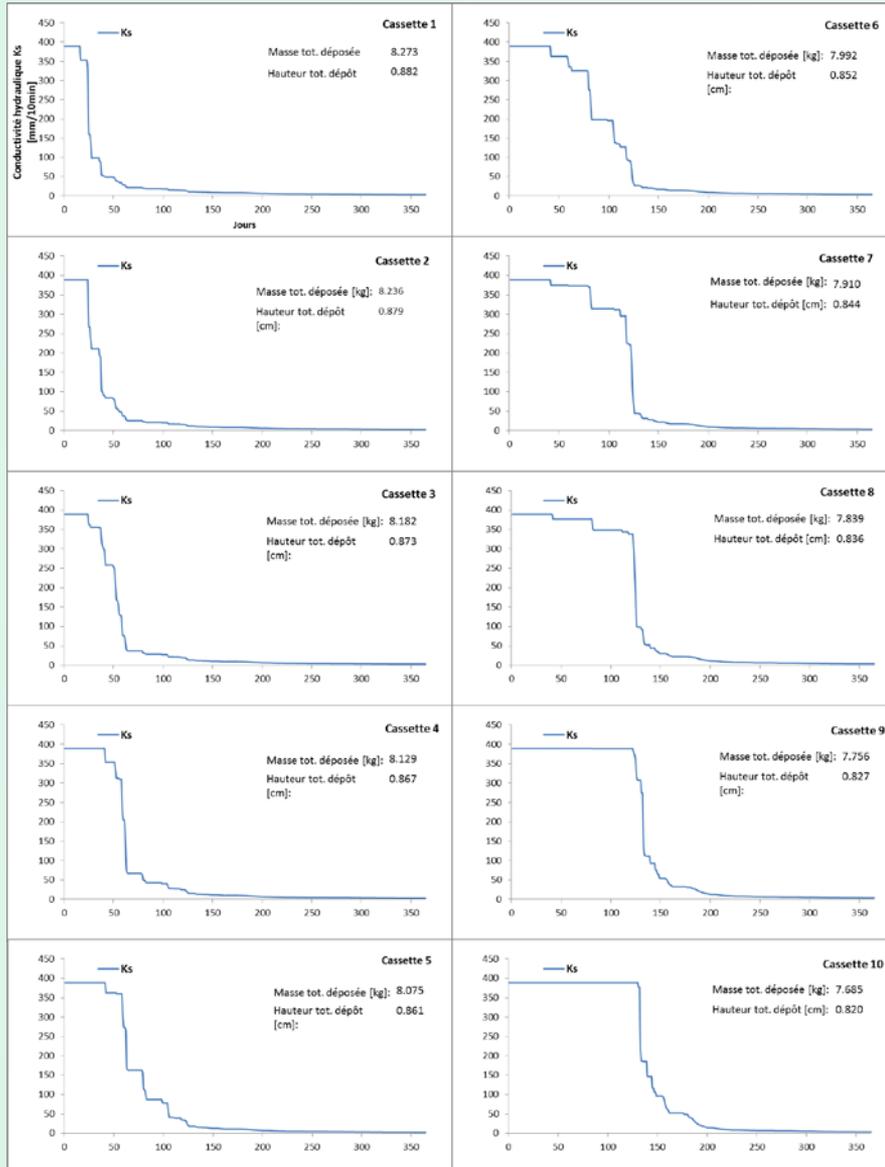
2002 (volume annuel max., intensité moyenne min.)



Modèle de distribution des flux avec prise en compte du colmatage - résultats année 2002

10 cassettes BC30% : K initial = 389 mm/10min
 Pourcentage de volume annuel traité 61.30%

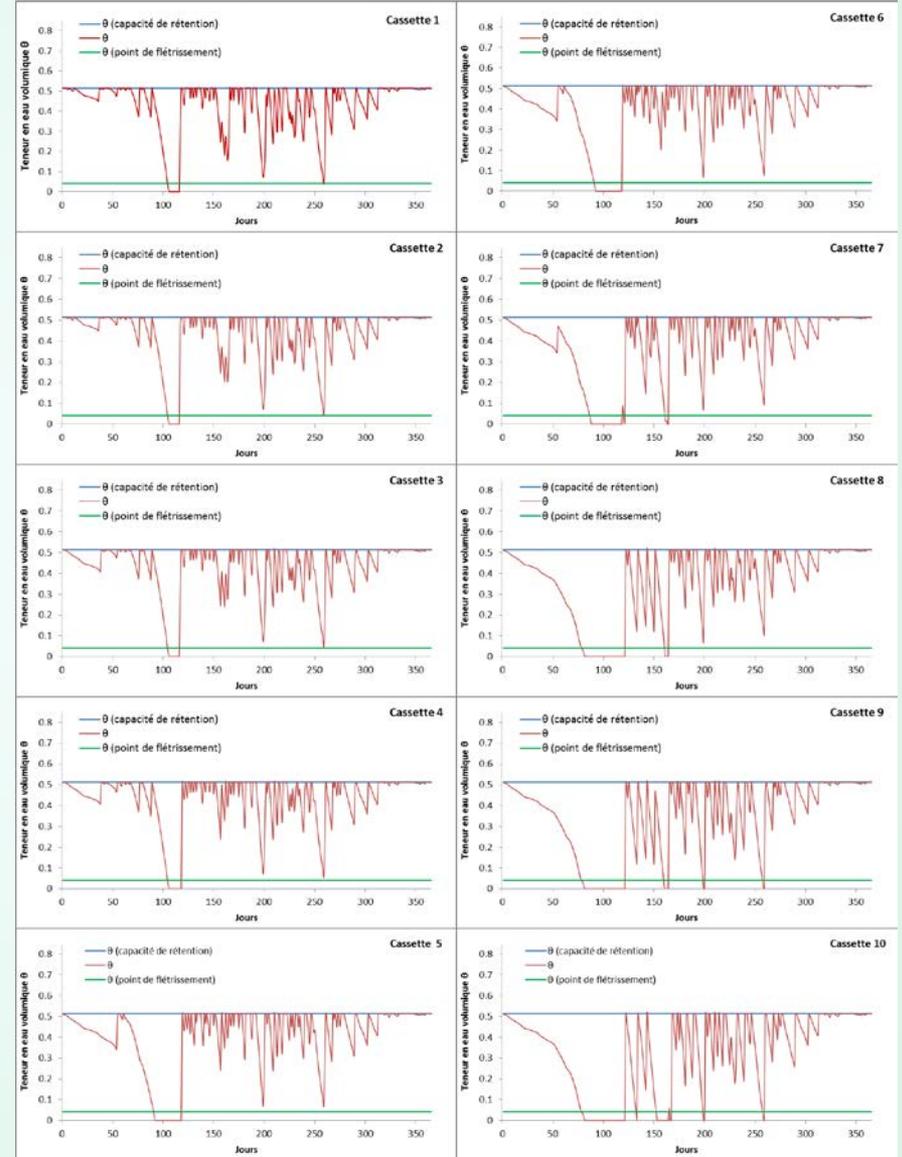
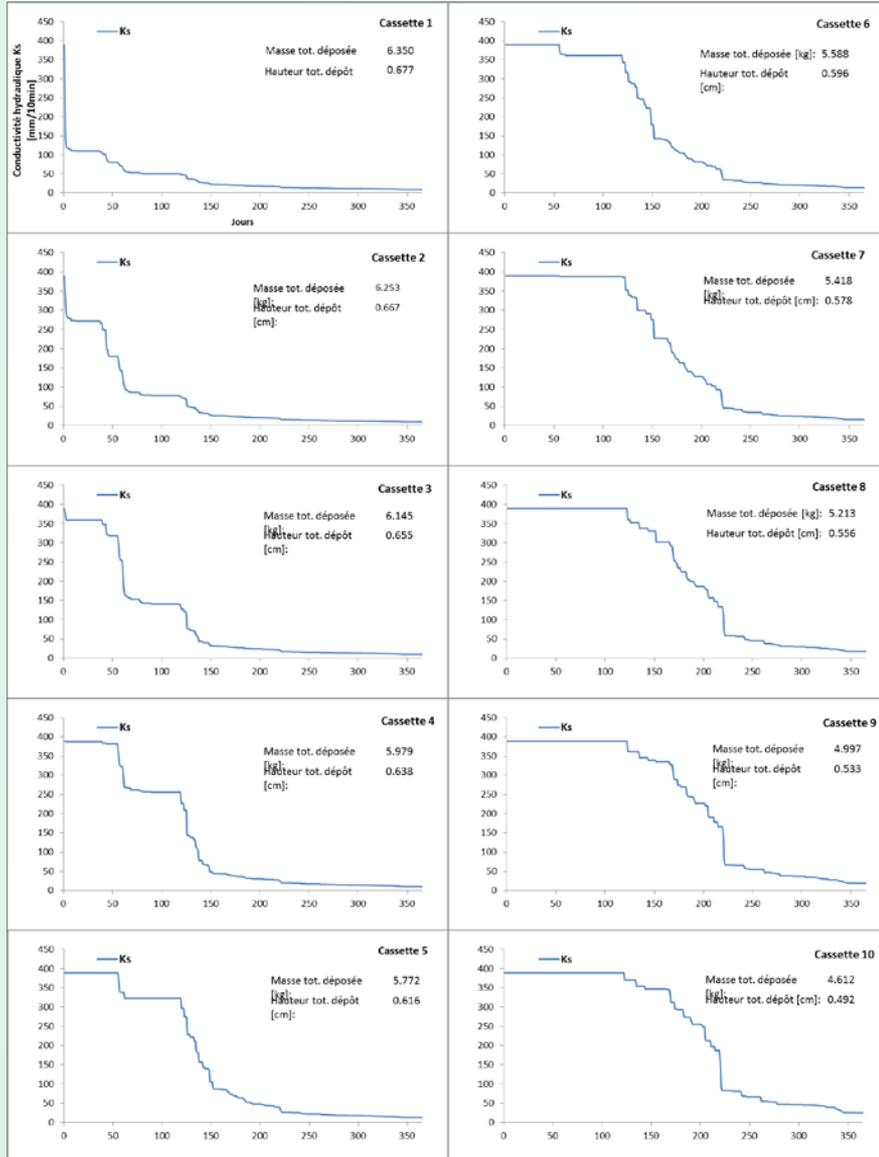
[MES] = 150 g/m³



Modèle de distribution des flux avec prise en compte du colmatage - résultats année 2007

10 cassettes BC30% : K initial = 389 mm/10min
 Pourcentage de volume annuel traité 64.68%

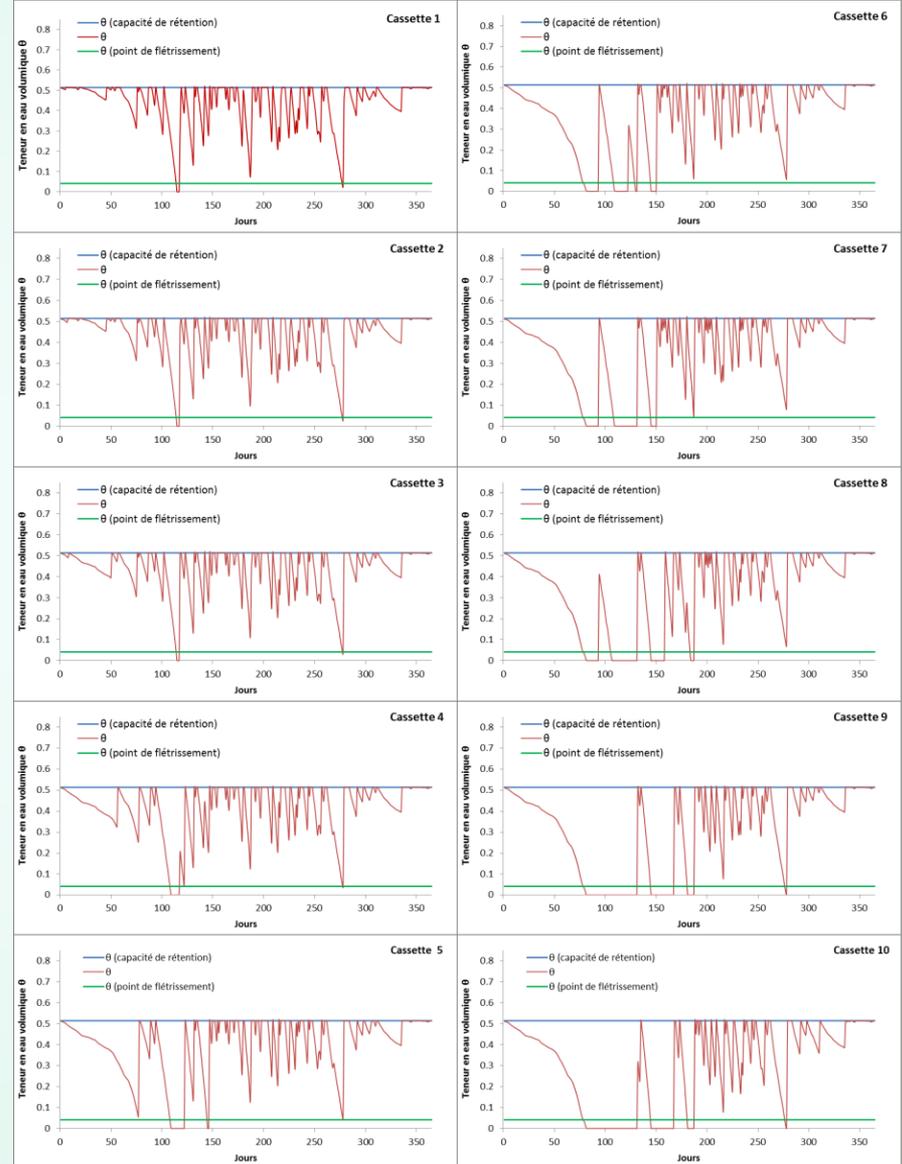
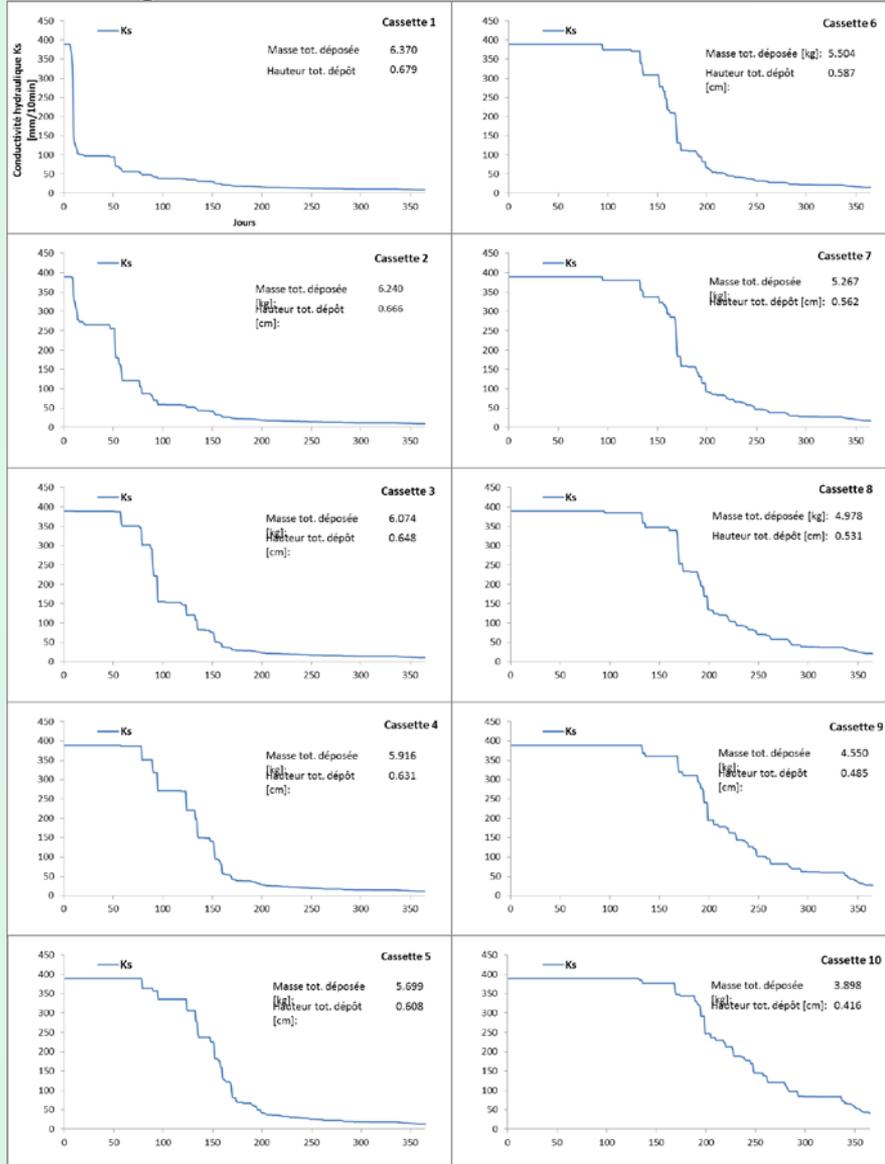
[MES] = 150 g/m³



Modèle de distribution des flux avec prise en compte du colmatage - résultats année 2011

10 cassettes BC30% : K initial = 389 mm/10min
 Pourcentage de volume annuel traité 64.68%

[MES] = 62.58 g/m³



Conclusions et perspectives

- Conception des cassettes efficace
- Rendement hydraulique initial suffisant, mais baisse avec le colmatage
- Paramètres pouvant être adaptés: perméabilité, surface cassette, hauteur d'eau
- Survie des végétaux: surveillance et arrosage nécessaire

Nécessité de l'amélioration du modèle:

- Hydrologie
- Concentration MES
- Relation MES-K

Evolution du système due à l'activité biologique?

Tests sur le terrain: vérification des conclusions de ce travail et évaluation de l'efficacité dépollutive



Remerciements

EIA FR: Prof. Fabienne Favre Boivin, Prof. Jean-Marc Ribi, Prof. Richard Baltensperger, Bruno Spahni, Yanis Schaller

HEPIA: Prof. Pascal Boivin, Karine Gondret

MERCI POUR VOTRE ATTENTION!

