



HAL
open science

Modèles de Calcul des Flux de MES en réseau d'assainissement par temps de pluie

A. Hannouche

► **To cite this version:**

A. Hannouche. Modèles de Calcul des Flux de MES en réseau d'assainissement par temps de pluie. Séminaire HURRBIS, 2011, Marne la Vallée, France. hal-00758477

HAL Id: hal-00758477

<https://enpc.hal.science/hal-00758477>

Submitted on 1 Apr 2014

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

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



Modèles de Calcul des Flux de MES en réseau d'assainissement par temps de pluie

Par:

A. Hannouche

18/12/2013

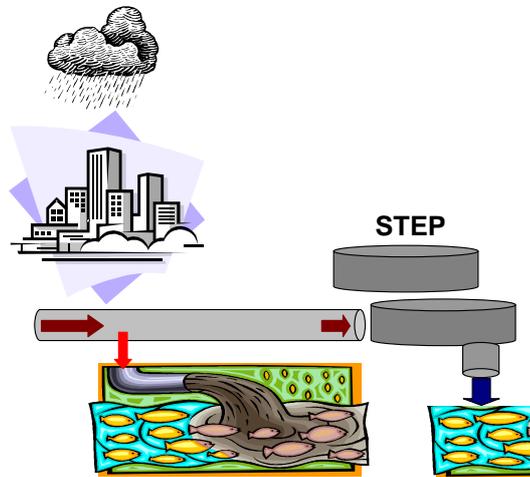
Bonjour à vous tous,

Je suis en troisième année de thèse au LEESU en contrat CIFRE avec SEPIA Conseils dans le cadre d' HURRBIS. Mes travaux portent sur la question de transport solide en réseau d'assainissement unitaire par temps de pluie.

Je voudrais vous présenter l'état actuel des modèles de calcul des flux de MES en réseau d'assainissement par temps de pluie

Contexte général

Pourquoi modéliser les flux de MES



Déversements directs d'effluents non traités dans le milieu naturel

18/12/2013

Prise de conscience de l'importance des rejets urbains de temps de pluie

Matières En Suspension (MES) = principal vecteur de certains polluants dans les réseaux d'assainissement

Important effort de recherche sur les MES : complexité des mécanismes de transport, variabilité des processus

Besoin des modèles opérationnels de calcul des flux de MES

Il y a une prise de conscience de l'importance des RUTP

Les MES jouent un rôle important comme le principal vecteur de certains polluants dans les réseaux d'assainissement

Il y a eu un important effort pour caractériser les MES, comprendre leur dynamique et évaluer le flux de ces MES

Principaux travaux

Les principaux travaux des observatoires sur les MES en réseau assainissement:

- **M.C. Gromaire-Mertz (1998):** la pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire caractéristiques et origines
 - **M. Ahyerre (1999):** bilans et mécanismes de migration de la pollution organique en réseau d'assainissement unitaire
 - **A. Maréchal (2000):** Relations entre caractéristiques de la pollution particulaire et paramètres optiques dans les eaux résiduaires urbaines.
 - **C. Oms (2003):** localisation, nature et dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement unitaire
 - **A. Kanso (2004):** Evaluation des Modèles de Calcul des Flux Polluants des Rejets Urbains par Temps de Pluie. Apport de l'Approche Bayésienne
 - **M. Mourad (2005):** Modélisation de la qualité des RUTP : sensibilité aux données expérimentales et adéquation aux besoins opérationnels
 - **C. Lacour (2009):** Apport de la mesure en continu pour la gestion de la qualité des effluents de temps de pluie en réseau d'assainissement
 - **M. Métadier (2011):** Traitement et analyse de séries chronologiques de turbidité pour la modélisation des rejets urbains par temps de pluie
 - Post doc (2011)
 - **A. Hannouche (2012):** Analyse de transport solide en réseau d'assainissement unitaire par temps de pluie
- 18/12/2013 3

Dans le cadre de trois observatoires, il y a eu 8 thèse et un post-doc sur la caractérisation, modélisation de MES

Données utilisées

- **QASTOR**: 13 Bassins versants (6 réseaux pluviaux, 7 unitaires), différentes occupations du sol
- **Le Marais (Paris)**: centre urbain dense, réseau unitaire, données sur les différentes surfaces urbaines et à l'exutoire du réseau; données sur les processus
- **Quais et Clichy (Paris)**: urbain dense, réseau unitaire, mesure de la turbidité-conductivité en continu sur 3,5 années
- **Chassieu et Ecully (Lyon)**: Urbain, Pluvial (Chassieu) et unitaire (Ecully) mesure de la turbidité-conductivité en continu sur 4 ans, MES-turbidité
- **Cordon Bleu et Saint-Mihiel (Nantes)**: Données MES-Turbidité
- **Duchesse Anne (Nantes)**: Périurbain urbanisé, mixte, mesure de la turbidité-conductivité en continu sur 3 ans, MES-turbidité

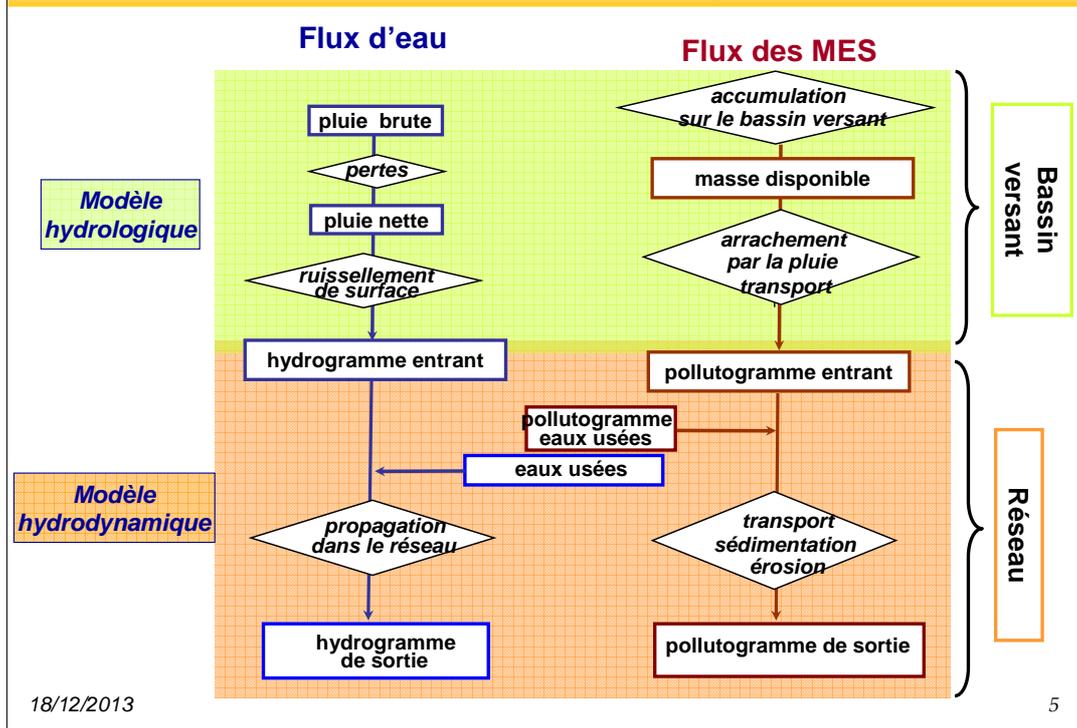
18/12/2013

4

Avant la mise en place des observatoires, les chercheurs ont construit la base des données QASTOR

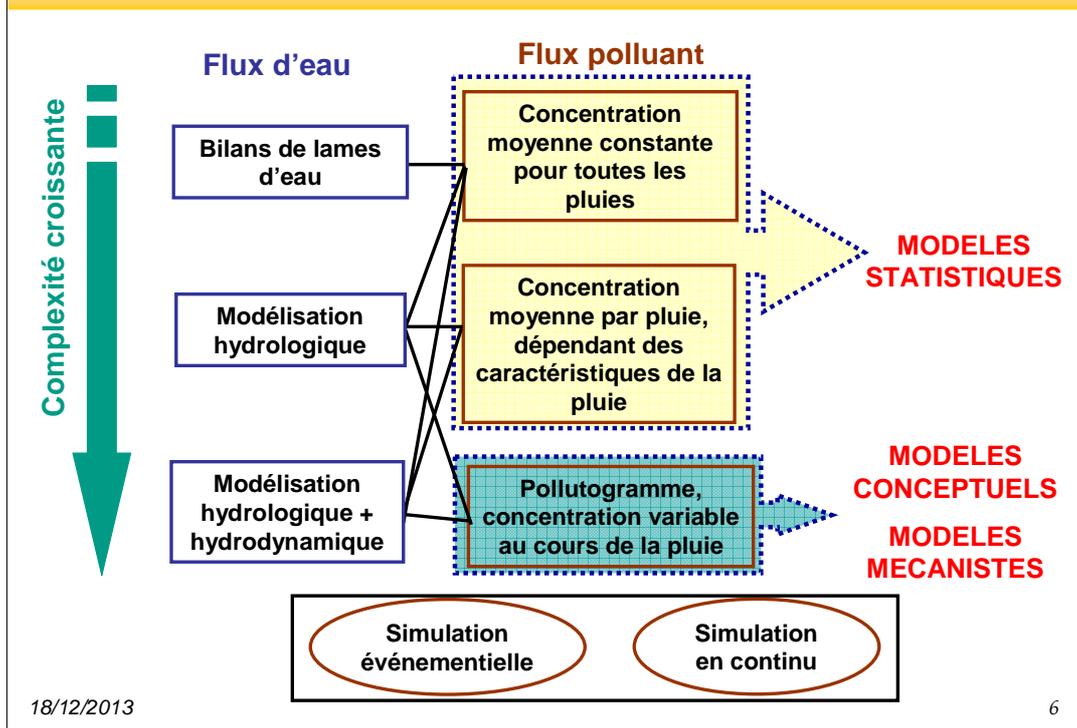
Depuis la mise en place des observatoires, on commence à avoir une grosse base données sur des sites de caractéristiques différentes. cette base est formée de mesures ponctuelles et des mesure en continu de la turbidité et de la conductivité

De la PLUIE au FLUX de MES - processus



C'est une vue schématique des principaux phénomènes pour la modélisation qualitative et quantitative en réseau d'assainissement. Le schéma de la modélisation de flux de MES est à peu près le même de celui de flux d'eau. Ce schéma est formé de deux compartiments: la surface et le réseau. Sur la surface, il y a l'accumulation de particules par temps sec et l'érosion de ces particules puis entrainement dans le réseau. En réseau unitaires, ces eaux se mélangent avec les eaux usées et on aura un processus complexe de transfert de ces eaux couplé avec des processus d'érosion et de sédimentation en réseau

De la PLUIE au FLUX de MES - modèles



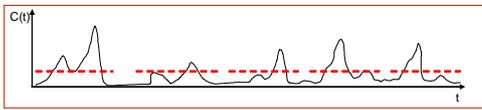
Les modèles actuels proposés dépendent du niveau de complexité. On peut remarquer deux grandes catégories de modèles: Les modèles statistiques et les modèles détaillées. Les modèles statistiques sont utilisées pour évaluer une masse annuelle ou concentration caractéristique ou une masse ou concentration événementielle qui dépende des caractéristiques de la pluie

De même pour le calcul de flux d'eau, il y a des différents types de modèles

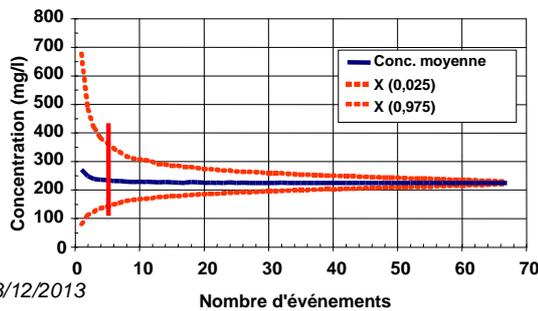
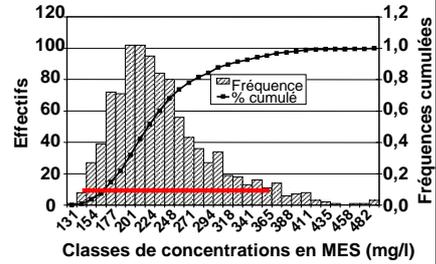
Le calcul peut être fait sur une échelle annuelle, événementielle ou intra-événementielle

De la PLUIE au FLUX de MES - modèles statistiques (M. Mourad, 2005)

Concentration moyenne constante pour toutes les pluies
Combien de pluies pour une bonne évaluation de la concentration moyenne?



Distribution de la concentration moyenne calculée sur 5 événements tirés aléatoirement



Incertitudes sur la concentration moyenne en MES en fonction du nombre d'événements étudiés

18/12/2013

7

Prenant le cas d'un calcul de la concentration caractéristique, généralement on échantillonne de 3 à 5 événements et on calcule une concentration moyenne. Avec 5 événements, les incertitudes sont de l'ordre de $\pm 50\%$! Et pour obtenir une incertitude de l'ordre de $\pm 20\%$ il faut échantillonner 20 événements par sites, qui est énorme!

De la PLUIE au FLUX de MES - modèles statistiques (A. Saget, 1998)

Masse par pluie, dépendant des caractéristiques de la pluie Exemples de régressions pour la base QASTOR

Site	MES	
Séparatif	Equation	R ²
Vélizy	$0.85Q_{max}+1.2D_{ts}-241$	0.91
Centre urbain	$77I_{mtc}+292$	0.25
Ulis sud	$0.45V_r+2.2Q_{max}-211D_p+213$	0.91
Malnoue	$370I_{mtc}-30H_i+410H_p-$ $0.94V_r-1300$	0.90
Unitaire		
Mantes	$1.4Q_{max}+14D_p-59$	0.96
La Briche DD11	$910H_p+12000$	0.67
La Briche D11	$0.49V_r-720H_p-3400$	0.72
La briche Enghien	$1700D_p+1200$	0.53
La Briche PLB	$8.4Q_{max}+53D_{ts}-$ $9200H_p+0.35V_r-51000$	0.91

- Relations très différentes en fonction du site
- Qualité des relations très variable en fonction du site

18/12/2013

8

Pour le cas des modèles de masse ou concentration événementielle, on trouve des fois de bonne corrélations avec les caractéristiques de la pluie, mais ces relations sont très différents en fonction de sites.

De la PLUIE au FLUX de MES - modèles statistiques (M. Mourad, 2005)

Concentration moyenne événementielle dépend des caractéristiques des pluies
Combien de pluies pour un bon calage et une évaluation de modèles de régression

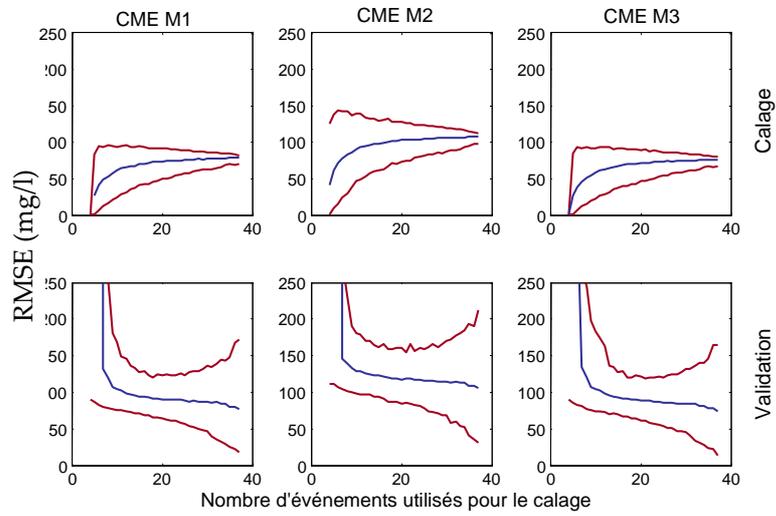
CME	{	$ME = K \cdot DTS^a \cdot I_{\max 5}^b \cdot Vr^c$	M1
		$CME = ME \cdot Vr^{-1} = K \cdot DTS^a \cdot I_{\max 5}^b \cdot Vr^{c-1}$	
		$ME = K \cdot H_{\text{tot}}^a \cdot D^b$	M2
$CME = ME \cdot Vr^{-1} = K \cdot H_{\text{tot}}^a \cdot D^b \cdot Vr^{-1}$			
		$CME = K \cdot DTS^a \cdot H_{\text{tot}}^b \cdot I_{\max 5}^c$	M3

18/12/2013

9

Si on veut caler et valider des modèles de masse ou des concentrations événementielles, « en fait les concentrations événementielles sont déduites de la masse par un simple rapport avec le volume de la pluie »

De la PLUIE au FLUX de MES - modèles statistiques (M. Mourad, 2005)



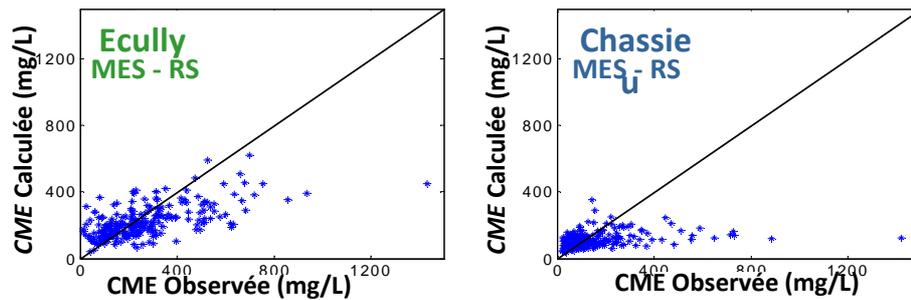
18/12/2013

10

Il faut un vingtaine d'événements pour obtenir une prédiction relativement fiable

De la PLUIE au FLUX POLLUANTS - modèles de multi-régression (M. Métadier, 2011)

- Mesure en continu
- Choix automatique des variables
- Evaluation des incertitudes



Complexité des phénomènes mis en jeu
Nécessité d'une analyse fine des processus

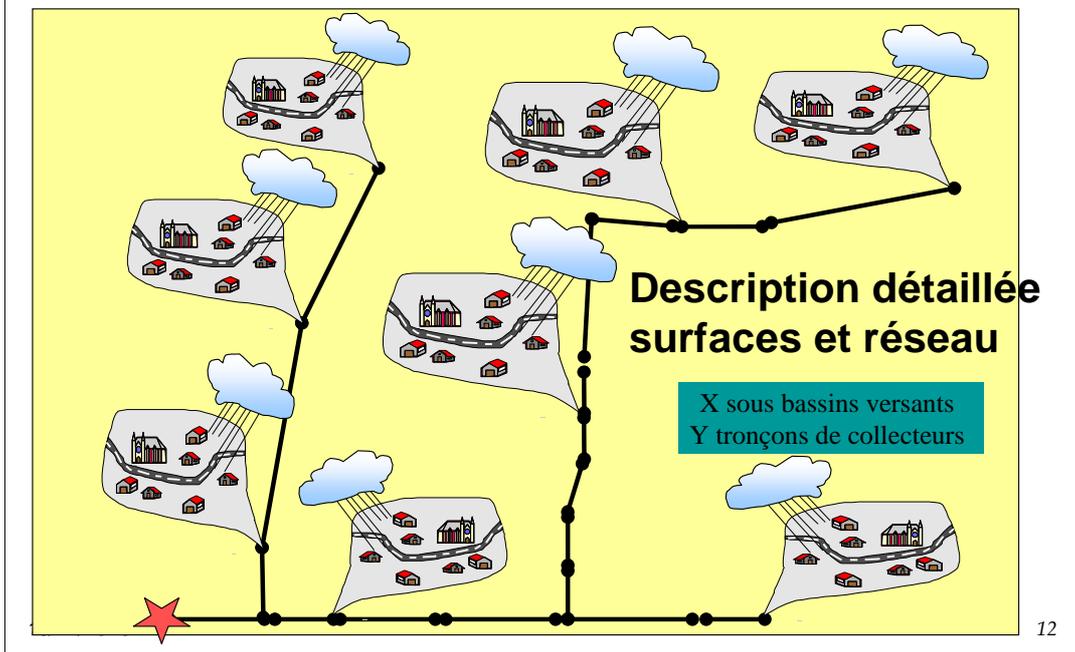
18/12/2013

11

Dans les observatoires, il y a eu des travaux pour améliorer les méthodes, l'algorithme de calcul et de plus il y a plus de données, mais le pouvoir prédictif de ces modèles reste faible

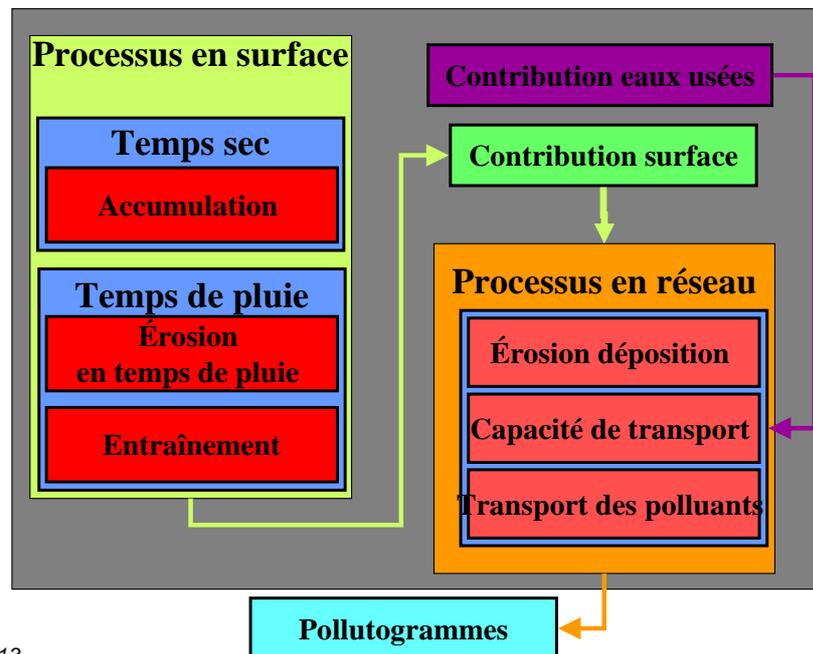
Donc, ça peut être due à la complexité des phénomènes mis en jeu, ce qui nécessite une analyse fine des processus.

De la PLUIE au FLUX POLLUANTS - modèles de processus



Pour faire ça il faut passer par une description détaillée du BV et du réseau

De la PLUIE au FLUX de MES - modèles détaillés



18/12/2013

13

Les modèles détaillés actuels sont modélisés par deux processus qui se rassemblent: les processus en surface: accumulation par temps sec et érosion pendant la pluie. Les processus en réseau sont plus complexe que ceux de la surface. Les phénomènes d'érosion \ sédimentation dépendent de la capacité de transport de l'écoulement

**De la PLUIE au FLUX POLLUANTS - modèles détaillés chaussées
(A. Kanso, 2004)**

Processus d'accumulation		Formulation mathématique
ACCU_TYPE_01	Asymptotique	$\frac{dMa(t)}{dt} = Daccu \cdot Simp - Dero \cdot Ma(t)$
ACCU_TYPE_02	Asymptotique	$\frac{dMa(t)}{dt} = Kaccu \cdot (M_{lim} \cdot Simp - Ma(t))$
ACCU_TYPE_03	Instantanée	$Ma(t) = Maccu \cdot Simp$
ACCU_TYPE_04	Stock infini	Pas d'accumulation
Processus d'érosion		Formulation mathématique
ERO_TYPE_01	F(Intensité, Masse disponible)	$\frac{dMa(t)}{dt} = -Wero \cdot I(t)^w \cdot Ma(t)$
ERO_TYPE_02	F(Intensité)	$Me(t) = Kero \cdot I(t)^w \cdot Simp$

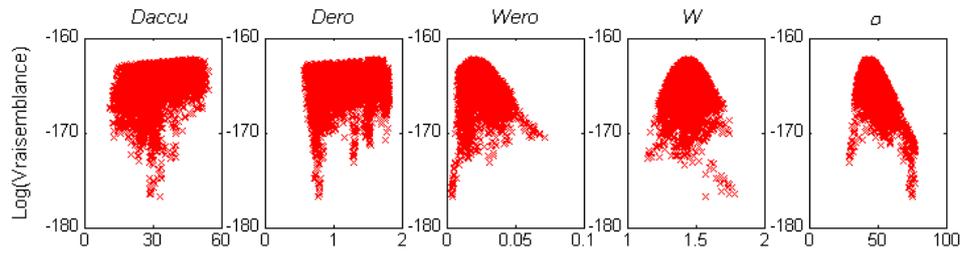
18/12/2013

14

À l'échelle de la chaussée, Kanso a testé plusieurs modèles d'accumulation par temps sec et d'érosion par temps de pluie. Il a calé avec une méthode Bayésienne les paramètres de ces modèles

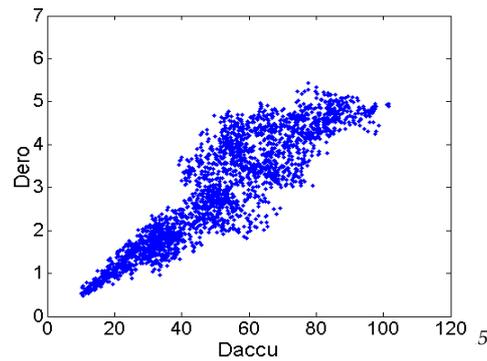
Pour ce modèle

De la PLUIE au FLUX POLLUANTS – Chaussées (A. Kanso, 2004)



Accumulation *Daccu* (kg/ha/j) et dispersion *Dero* (j^{-1}):

- Larges incertitudes
- Réponses du modèle non sensibles à ces deux paramètres
- Forte corrélation linéaire



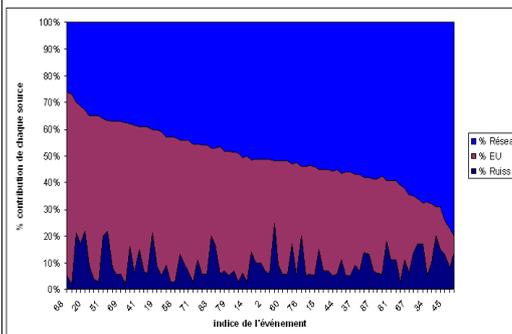
18/12/2013

Le calcul montre qu'on n'arrive pas à caler les paramètres et des fois il y a un sur-paramétrage dans les modèles. Ce qui fait que ces modèles ont un pouvoir prédictifs faibles

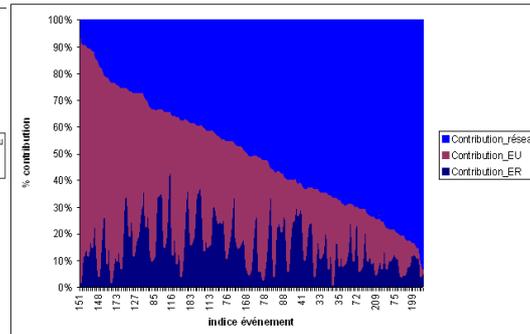
Contribution du réseau, (A. Hannouche, 2011)

Contribution du réseau

Paris: Clichy



Lyon: Ecully



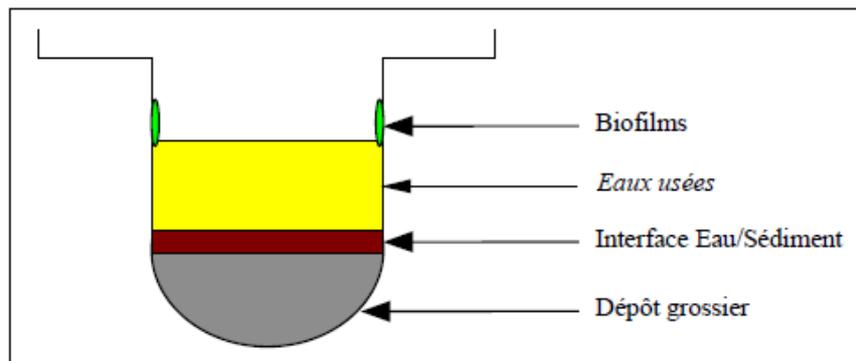
18/12/2013

16

Si on fait un bilan simple entre l'entrée, la sortie et les eaux usées, on trouve que le réseau contribue beaucoup à la masse de l'événement. Cette contribution est de l'ordre de 40 à 60 % de la masse de l'événement

La 1ere figure montre la contribution du stock des dépôts en réseau de Clichy qui est surdimensionné mais aussi, on voit à peu près la même chose sur le site d'Ecully à Lyon qui est pointu et ne présente pas des endroits de dépôts connus

Sédiments dans le réseau (C. OMS, 2003)



Typologie des dépôts en réseau d'assainissement

18/12/2013

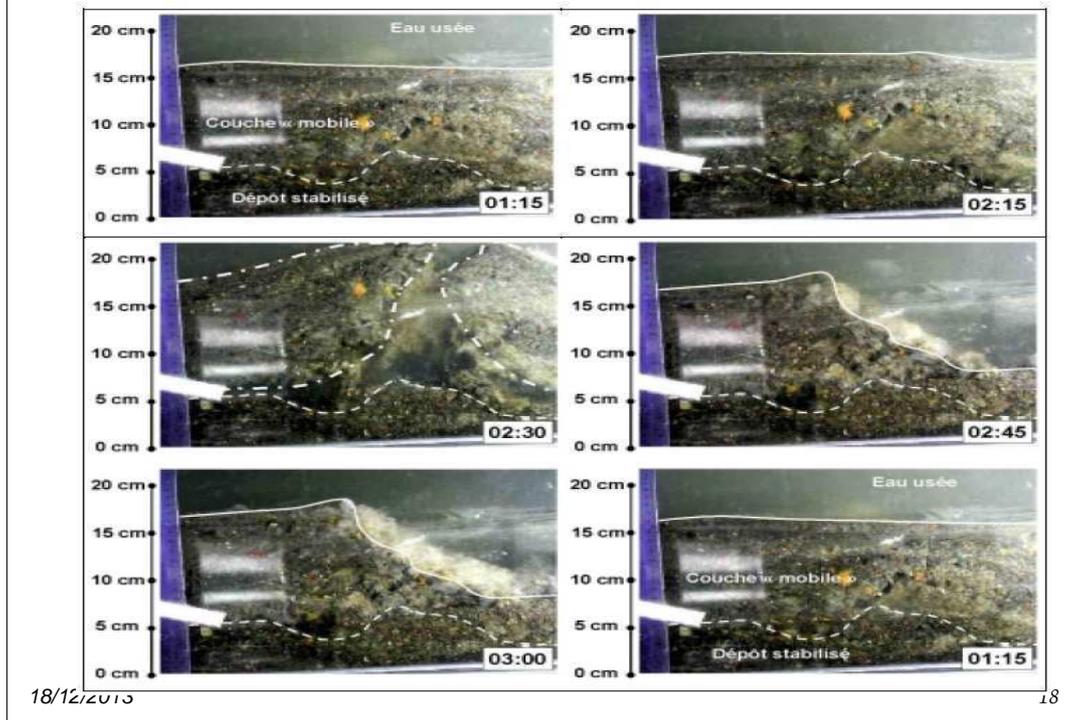
17

Quand on parle du stock, c'est quel type du stock qui s'érode?

Les chercheurs ont distingué trois types de dépôts dans le réseau d'assainissement:

Les biofilms, l'interface eau-sédiment (couche organique, Ahyerre 1999) et le dépôt grossier

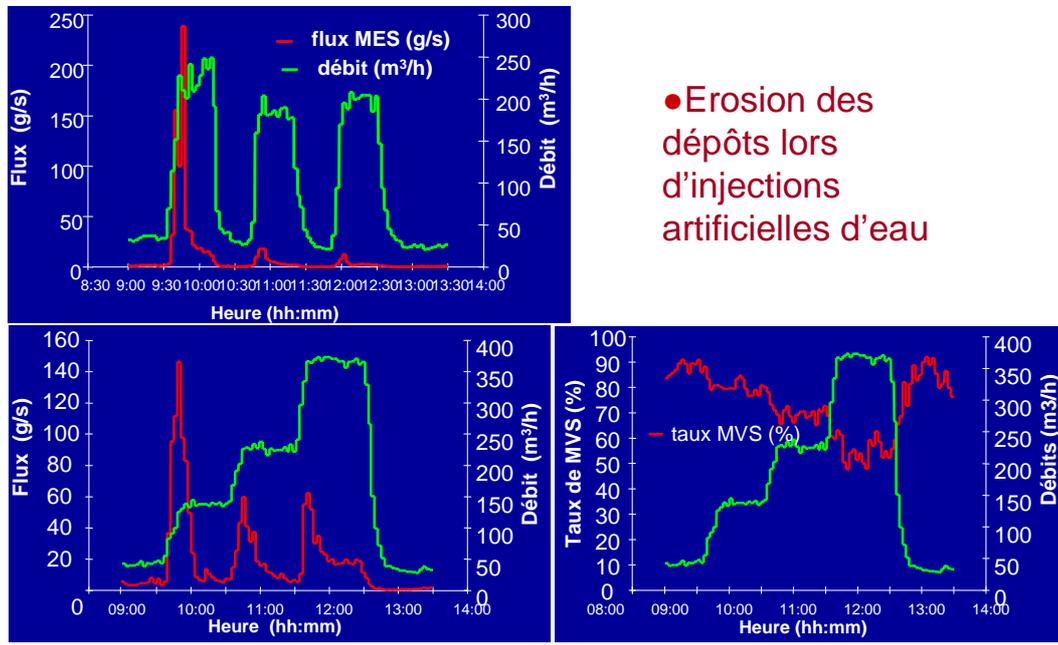
Sédiments dans le réseau (C. OMS, 2003)



OMS 2003, a observé dans ça thèse que durant les augmentations de débit, la couche organique est en partie érodée et transportée en suspension mais elle est également transportée par charriage

De la PLUIE au FLUX POLLUANTS – Erosion des dépôts (Ahyerre 1999)

● Processus dans le réseau d'assainissement



Ahyerre (1999) a montré que la couche organique est érodée par des taux de cisaillement très faibles et qu'elle est probablement stratifiée durant des expériences d'injection d'eau potable sur un tronçon du réseau du Marais. De plus la nature des dépôts érodés n'est pas le même

De la PLUIE au FLUX POLLUANTS - Réseau

● Processus dans le réseau d'assainissement

Erosion / déposition:

- Modèles basés sur la **capacité de transport**
Ackers White: concentration limite de déposition
Vélikanov: concentrations limites de déposition et d'érosion
- Modèle basés sur un **taux de cisaillement critique**
+ loi d'érosion et/ou loi de déposition

1 ou plusieurs classes de particules
4 à 5 paramètres de calage
Pb: conditions initiales des dépôts

Transport :

- **convection** (propagation à la vitesse de l'eau)
- **advection / dispersion**
- **équation de continuité** de la masse (morphological model)

18/12/2013

20

Les modèles actuels en réseau abordent de manière très simplifiée toutes ces connaissances tel que les modèles d'Ackers & White et le modèle de Velikanov. Il y a eu des essais de tenir compte des couches de dépôts mais il faut beaucoup de données.

Réseau: Conclusion- modèle réseau

- Modèles globaux sans description de la structure des dépôts est non satisfaisant
- Modèles avec description de la structure des dépôts sont satisfaisants mais ils demandent beaucoup de données pour les caler;
- Conditions initiales mal connues (caractéristiques et localisation des stocks mobilisables,...)

18/12/2013

21

En conclusion des modèles réseau

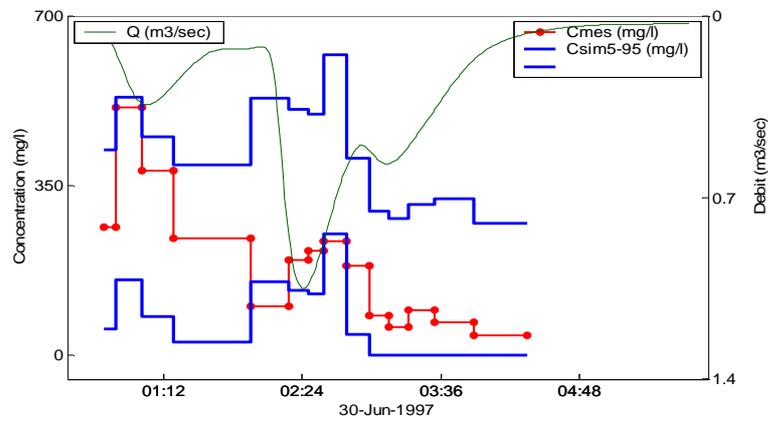
Modèles globaux

Modèles avec description de la structure ...

Condition initiales sont mal connues

Et les modèles ne tiennent pas compte de ces conditions

Modèle global (A. Kanso, 2004)



Larges intervalles de confiance liées à l'erreur aléatoire non expliquée par la structure du modèle

Pouvoir prédictif du modèle calé très faible

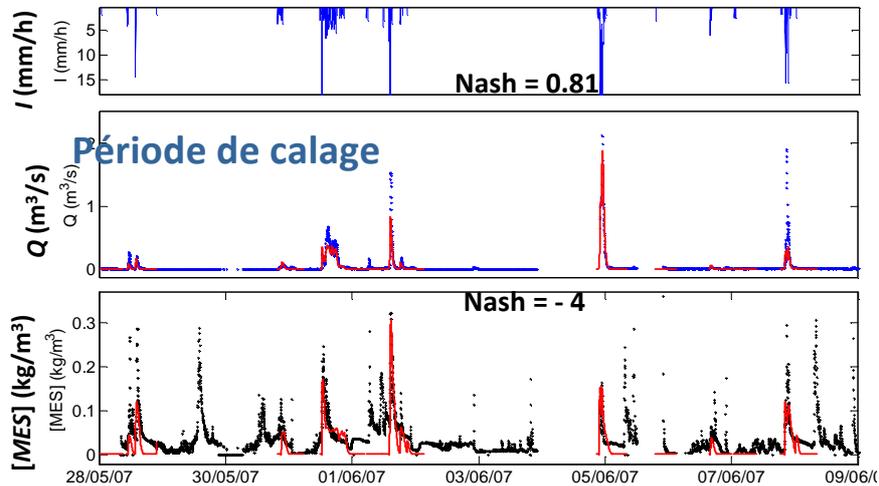
18/12/2013

22

Pour le modèle global, on a des larges incertitudes dans la prédiction du pollutogramme de MES ce qui montre que le pouvoir prédictif du modèle est très faible

ACCU-ERO- TRANSFERT (M. Métadier, INSA Lyon)

Utilisation de données en continu de débit et de la turbidité pour le calage et la validation d'un modèle détaillés



18/12/2013

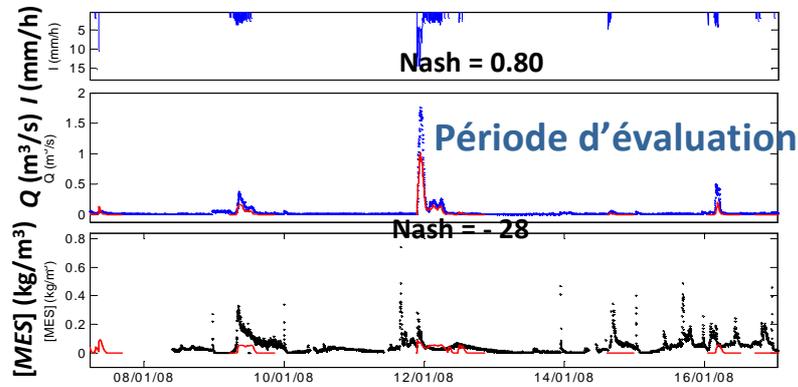
23

De plus une autre évaluation des modèles de RUTP faite par M. Métadier en utilisant la mesure en continu de la turbidité montre une qualité médiocres de ces modèles.

Mais il y a un autre problème, c'est la reproduction du débit où des fois on n'arrive pas à bien reproduire le signal débit

ACCU-ERO- TRANSFERT (M. Métadier, INSA Lyon)

Utilisation de données en continu de débit et de la turbidité pour le calage et la validation d'un modèle détaillés



Connaissance des processus
physiques encore insuffisante
Recherches en cours

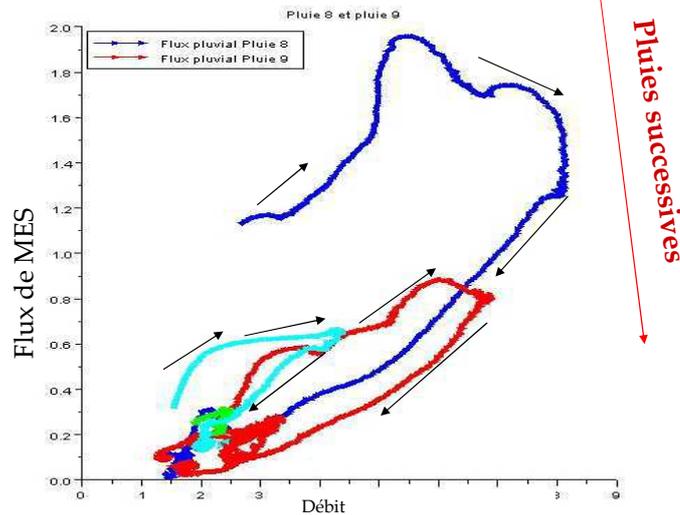
18/12/2013

24

Erosion/Transport dans le réseau

Erosion dans le réseau

Exemple: évolution des flux de MES à l'exutoire du bassin versant de Clichy



Voilà, dans le cadre de ma thèse on regarde de très près la question du transport de MES.

Dans cette figure on voit des courbes flux-débit des 4 pluies successives. C'est qui montre que les conditions initiales joue un rôle important, de plus le flux d'eau et le flux de polluants sont différents. On voit un hystérésis à l'intérieur de l'événement

Perspectives

Couplage expérimentation/modélisation:

- Bien décrire l'hydraulique: Fonction de production et l'hydrodynamique locale
- Bien modéliser le temps sec: débit et flux de MES
- Utiliser le flux d'un traceur conservatif comme référence pour la fonction de transfert de MES

MES/Contaminants: comment passer d'un modèle MES à un modèle contaminant

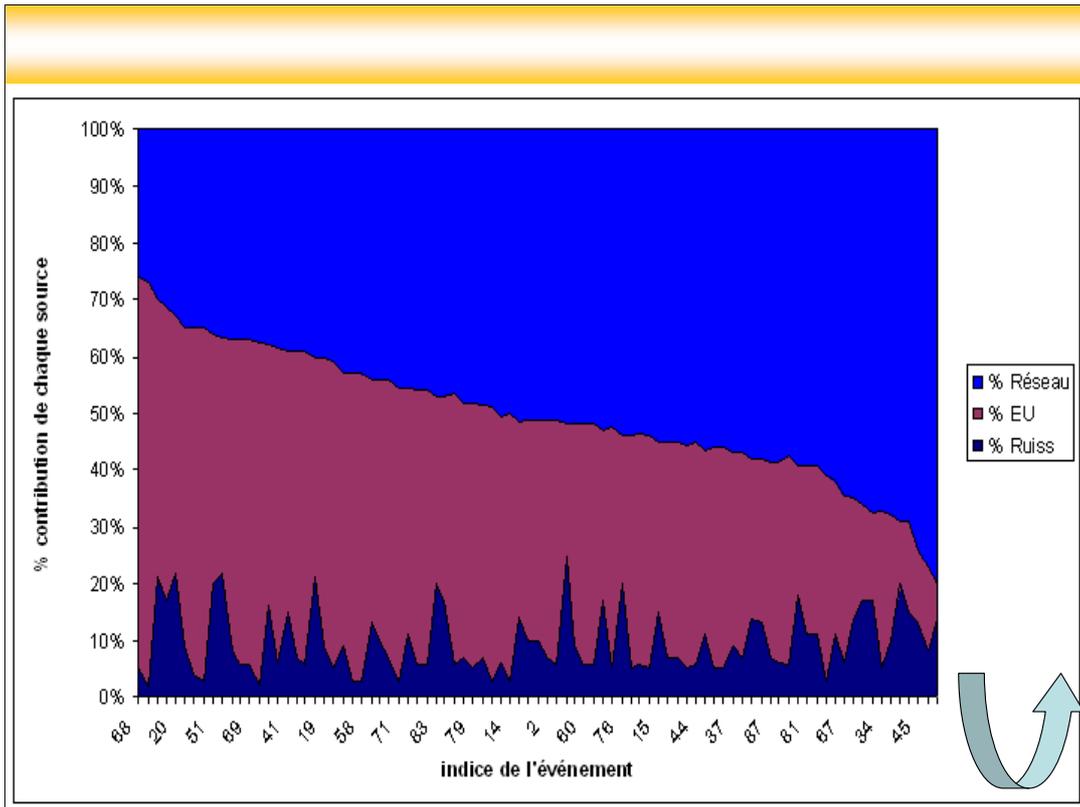
18/12/2013

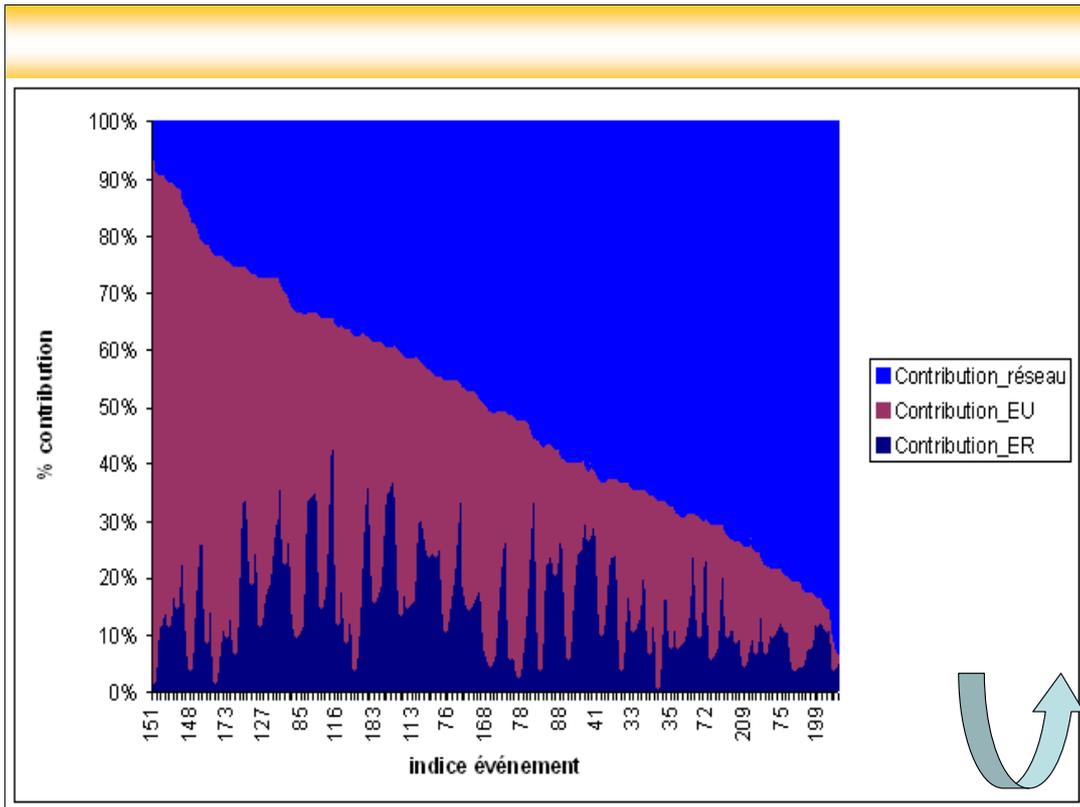
26

Les expérimentations doivent être conçues en fonction du modèle qu'on veut construire en particulier, il faut qu'on soit capable de décrire l'hydraulique en temps de pluie ainsi que le débit et le flux en temps sec

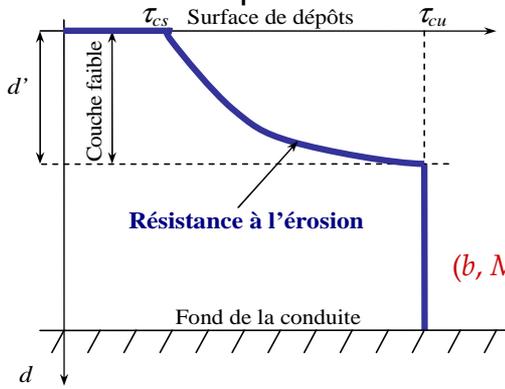
On pourra modéliser le transfert d'un traceur conservatif comme référence pour l'interprétation de flux de MES mesuré et en fin il faudra expliciter les relations entre flux de contaminants et le flux de MES







Réseau: Les modèles d'érosion- Skipworth

- Modèle de Skipworth**


$$\tau_c = \left(\frac{d^{1/b} (\tau_{cu} - \tau_{cs})}{d^{1/b}} \right) + \tau_{cs}$$

$$Me(t) = Mc \cdot \left(\frac{\tau_b(t) - \tau_c}{\tau_c} \right)$$

(b, Mc, τ_{cs} , τ_{cu} , d') : paramètres de calage
- Modèle global**
 Erosion ~ Masse du stock disponible et conditions hydrauliques

$$\frac{dMd(t)}{dt} = -\alpha_{ero1} \cdot Md(t) \cdot \tau_b(t)^{\alpha_{ero2}} ; (\alpha_{ero1} \text{ et } \alpha_{ero2}) : \text{paramètres de calage}$$

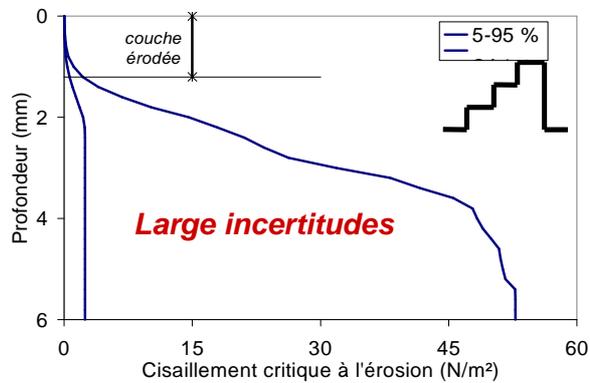
18/12/2013

30

Pas des bon resultats

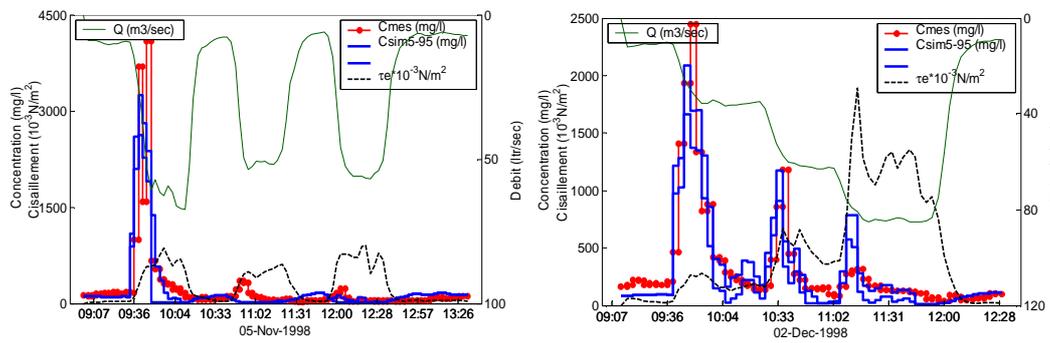
Réseau: Résultats de Skipworth

Evolution de la cisaillement critique à l'érosion avec le profondeur



- Difficile à estimer les caractéristiques de la couche faible
- Modèle est **surparamétré** et nécessite plus d'information pour être calé

Réseau: Résultats de Skipworth



- Le modèle confirme les observations

- La couche organique s'érode progressivement sous l'effet de l'augmentation de débit et donc du cisaillement
- Pour un taux de cisaillement constant, le stock érodable est limité et son érosion tend progressivement vers 0

18/12/2013

32