



Un modèle d'érosion diffuse des sols : prise en compte de l'interaction gouttes – écoulement.

NOUHOU BAKO Amina

**Journée Cascimodot Orléans
Decembre 2015**

Laboratoires d'accueil : INRA – UR SOLS et MAPMO

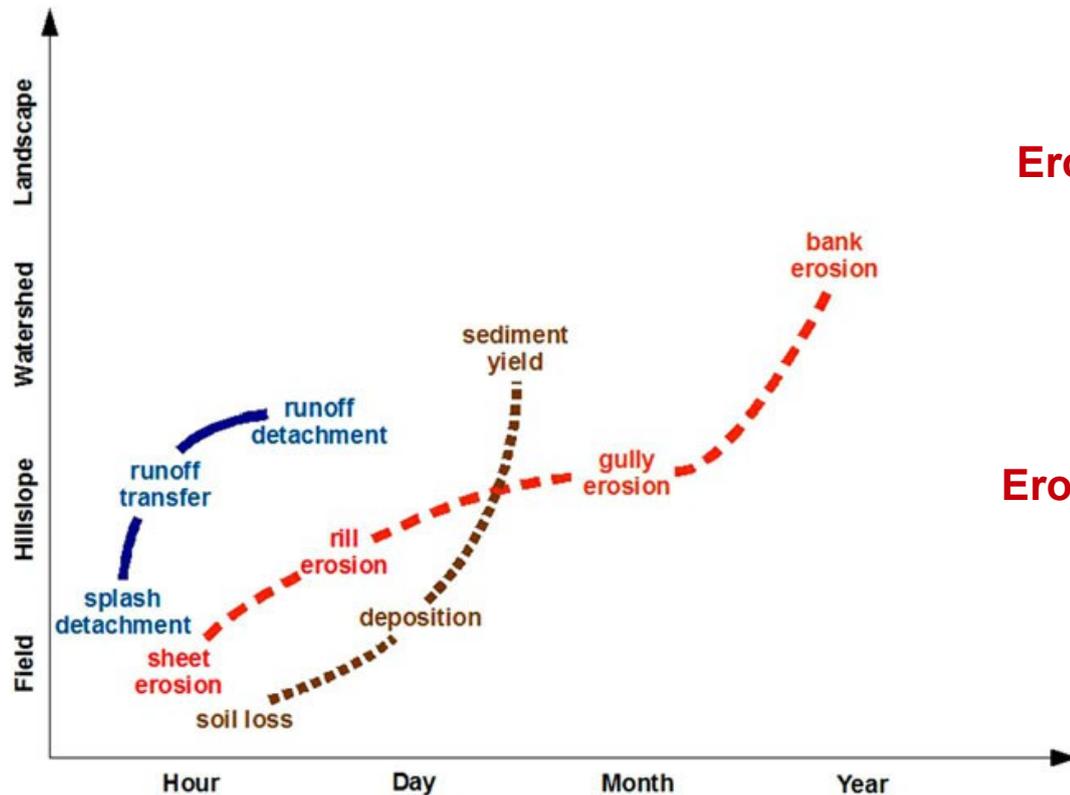
**Directeur de thèse : François James (MAPMO)
Encadrants : Frédéric Darboux (INRA) et Carine Lucas (MAPMO)**

Enjeux



Érosion hydrique des sols : définition

- Ensemble de **processus** provoquant la dégradation du sol sous l'action de l'eau
- Processus : **Détachement** + **Transport** + **Sédimentation**
 - 2 grands types d'érosion hydrique :



Erosion diffuse : faibles vitesses d'écoulement
faibles épaisseurs de lame d'eau



Erosion concentrée : fortes vitesses d'écoulement

Érosion diffuse

- ❖ Transport de polluants et de particules
- ❖ Dégradation des terres agricoles



Source :  dossier scientifique (photo FUSAGx-UHAGx)

Photos : INRA

Érosion concentrée

- Dégradation de la qualité des eaux de surface
- Destruction du paysage

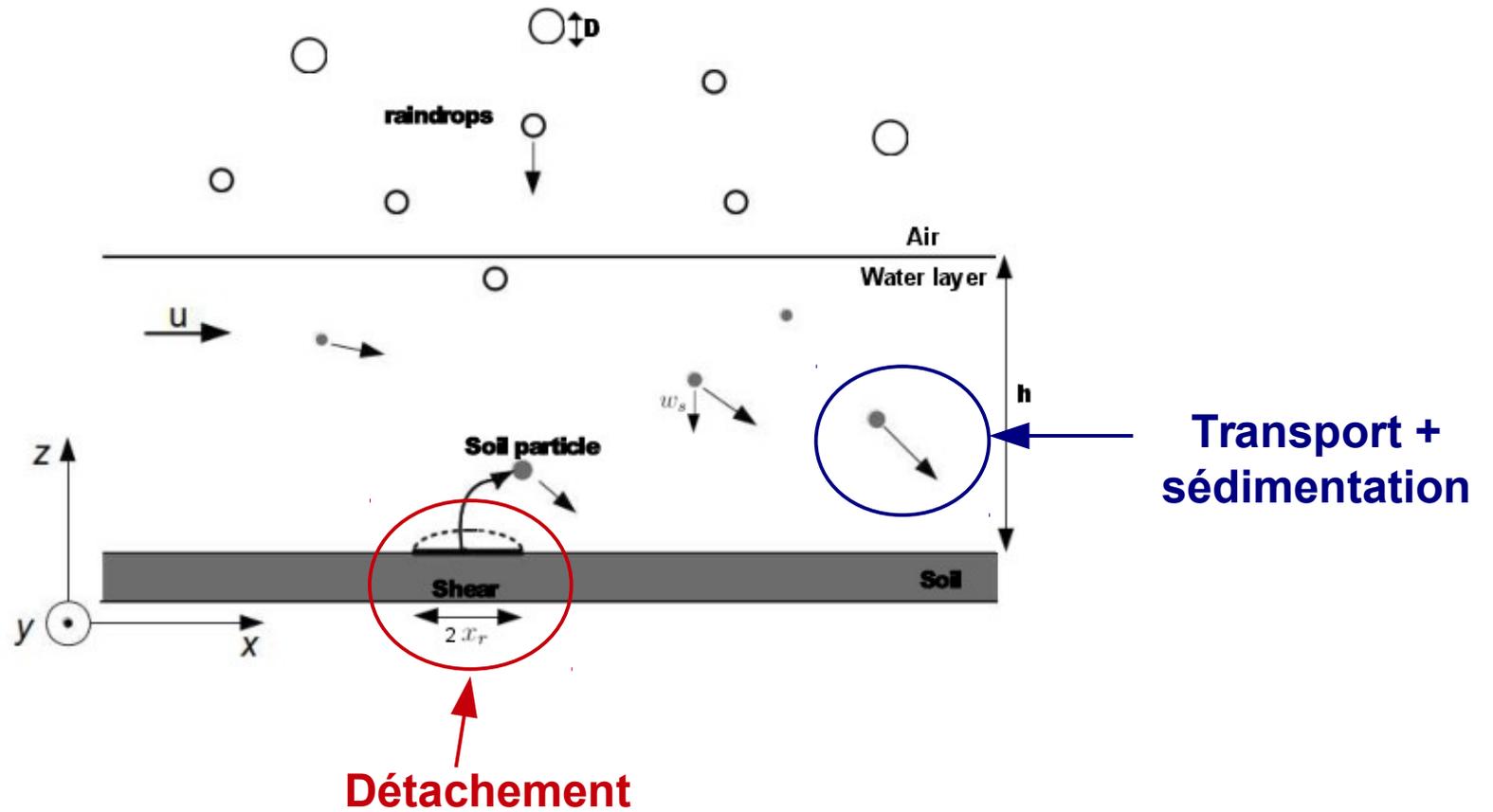


Étude de l'érosion diffuse : Objectifs

- Mieux comprendre le **rôle des gouttes** de pluie sur l'érosion des sols

- Proposer une loi **d'interaction gouttes** de pluie et **écoulement mince**

Processus de l'érosion diffuse

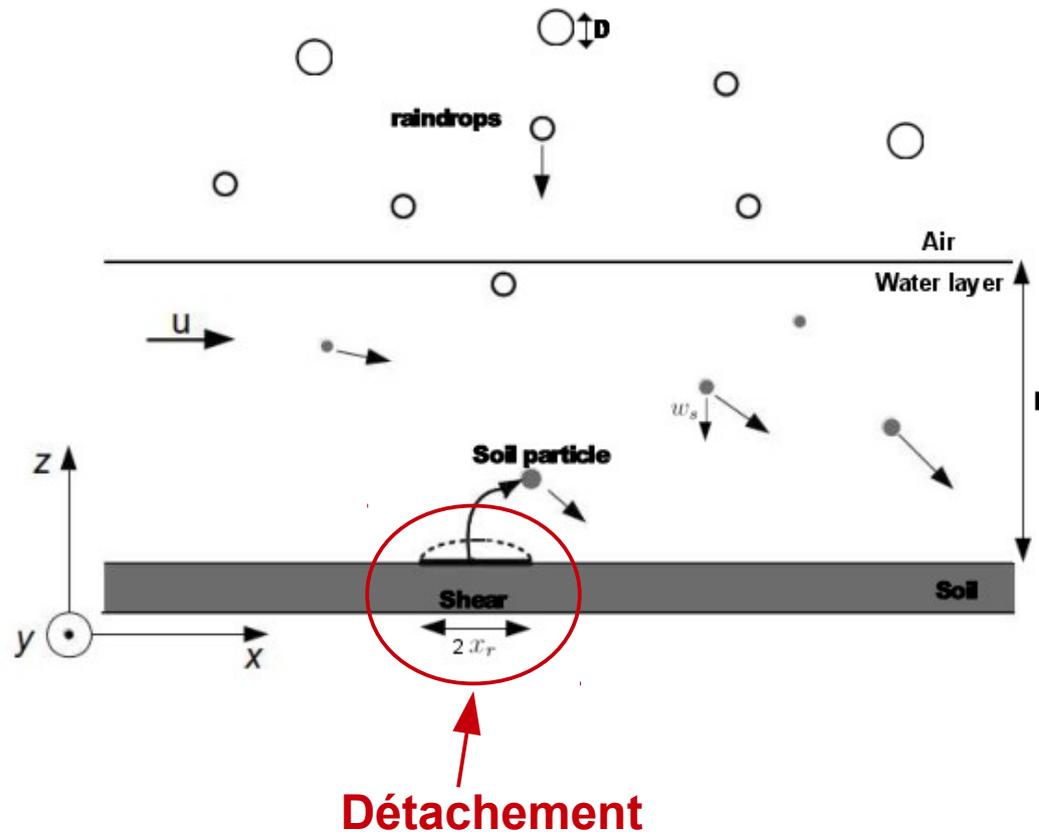


Plan

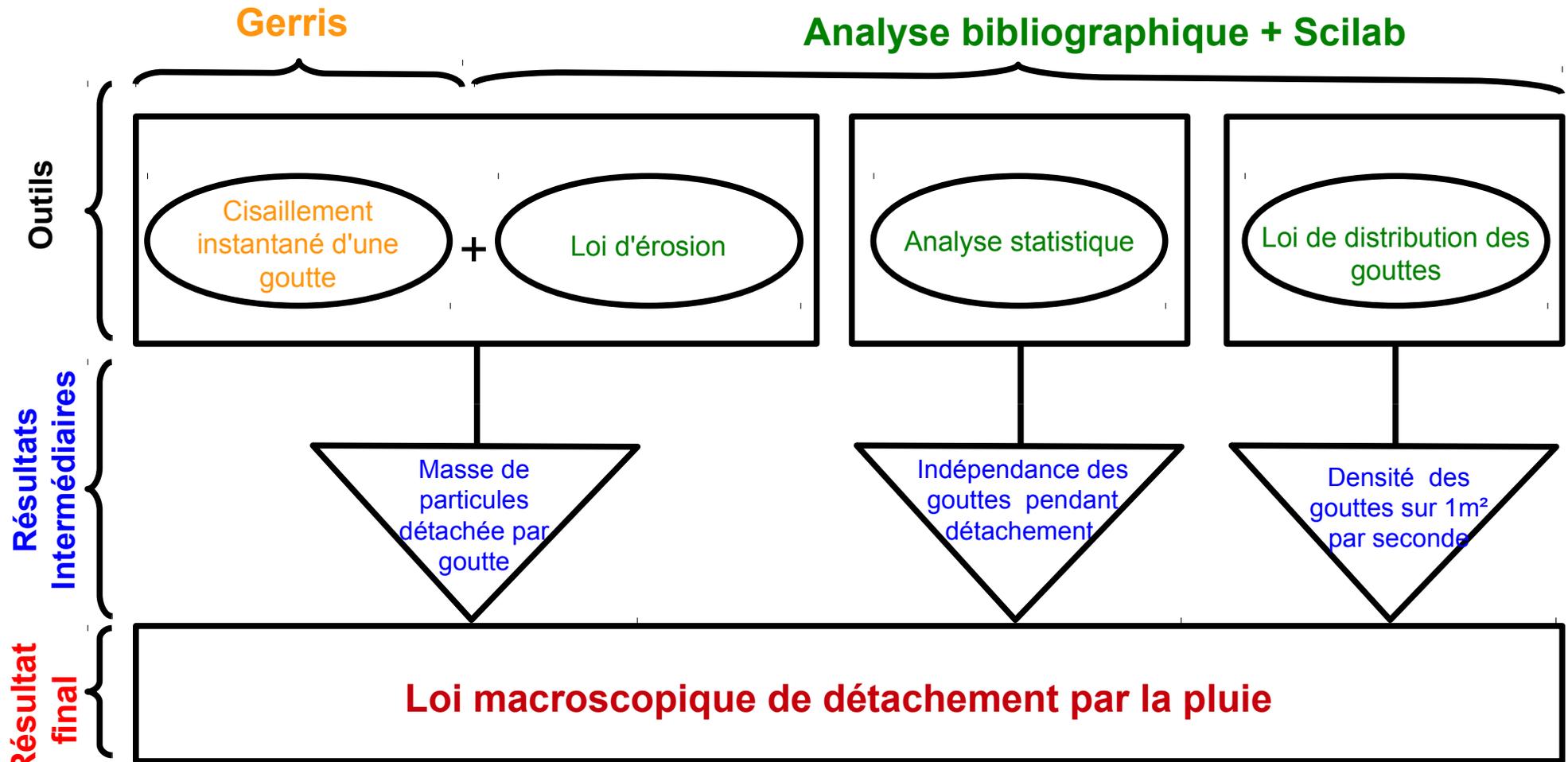
A. Modélisation numérique du détachement causé par la pluie

B. Modélisation du phénomène d'érosion

A. Modélisation du détachement causé par la pluie



Méthodologie générale



Gerris



➤ Équations diphasiques de Navier-Stokes

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mu \Delta \mathbf{u} + \gamma \kappa \delta_s \mathbf{n} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

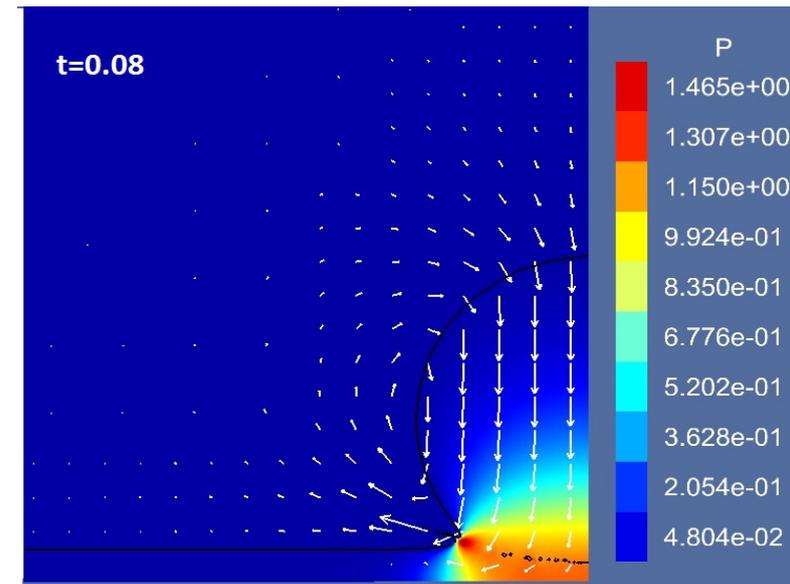
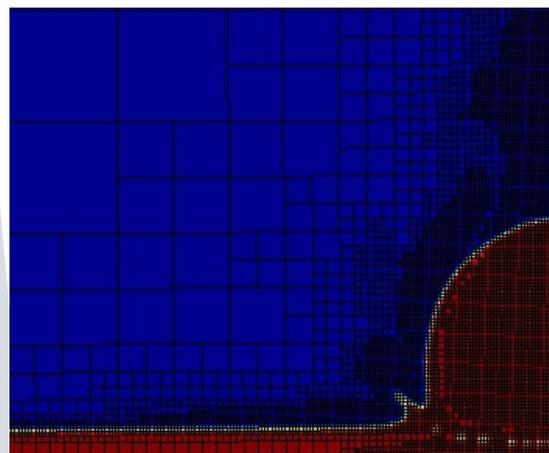
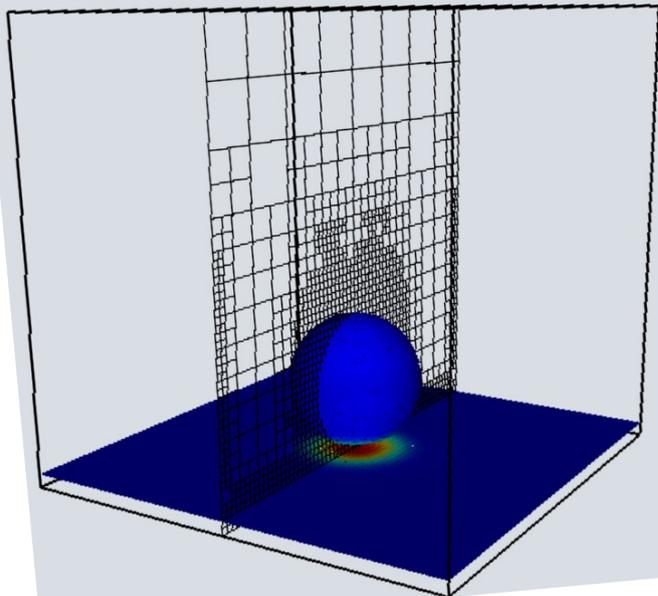
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = 0$$

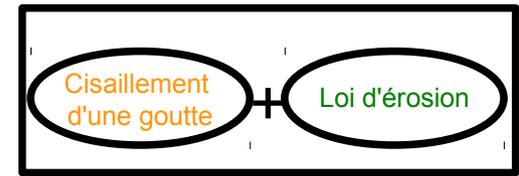
$$\rho(\mathbf{x}, t) = T(\mathbf{x}, t) \rho_l + (1 - T(\mathbf{x}, t)) \rho_g$$

$$\mu(\mathbf{x}, t) = T(\mathbf{x}, t) \mu_l + (1 - T(\mathbf{x}, t)) \mu_g$$

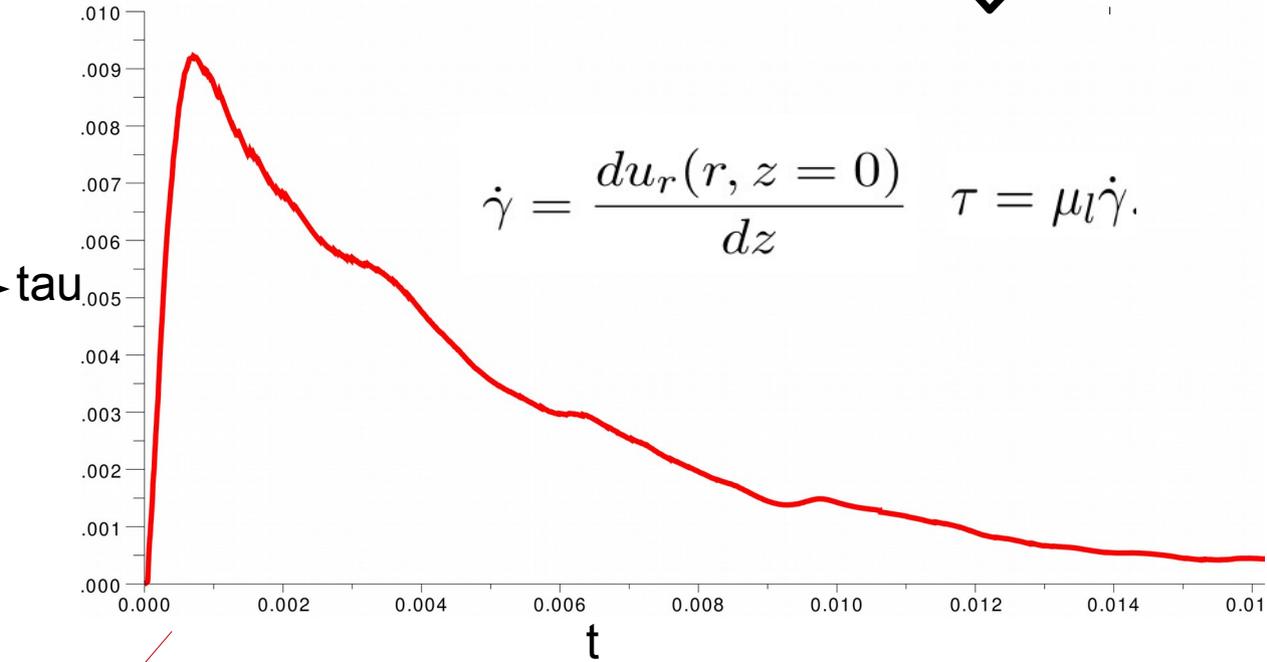
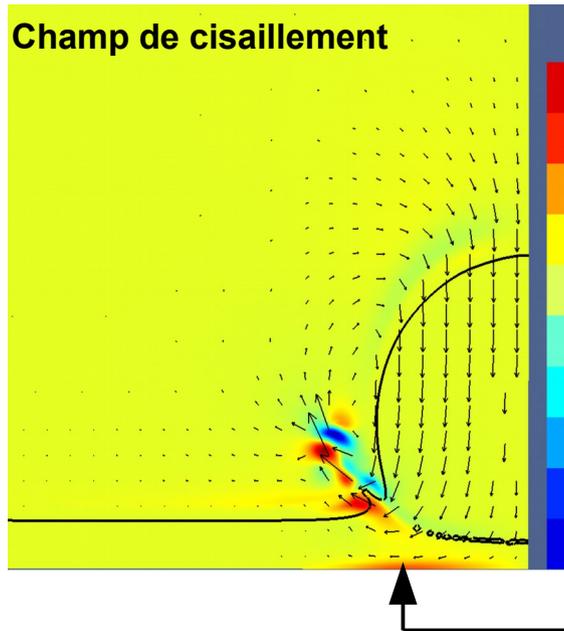
➤ Maillage adaptatif



1. Détachement causé par une goutte



♦ Simulation Gerris

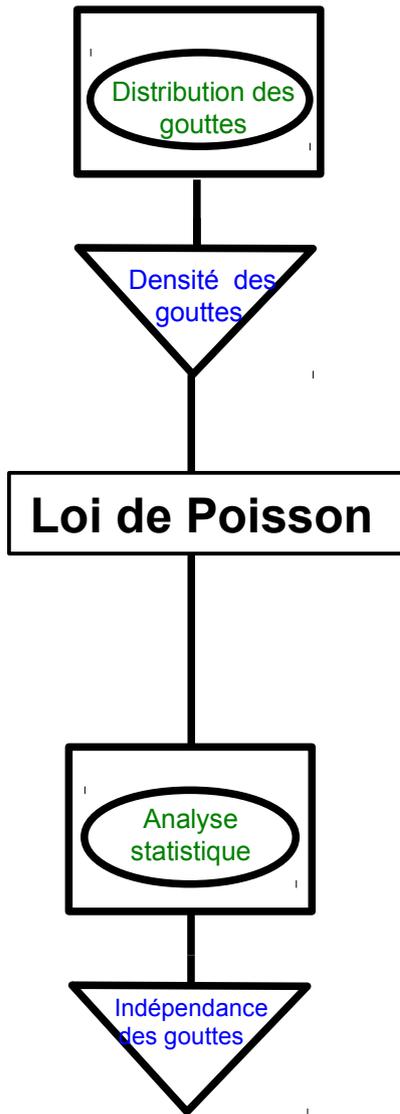


♦ Loi d'érosion à seuil

$$E = M(\tau - \tau_c) \quad (\text{McLean 1985, Lang 1989, Ariathurai 1974})$$

$$d_s(D) = 2\pi M \int_0^{t_{max}} \int_0^{R_{max}} (\tau_D - \tau_c) r dr dt$$

2. Caractéristiques de la pluie



Intensité \longrightarrow Répartition des gouttes en fonction de leur diamètre

Exemple : loi de Marshall-Palmer(1978)

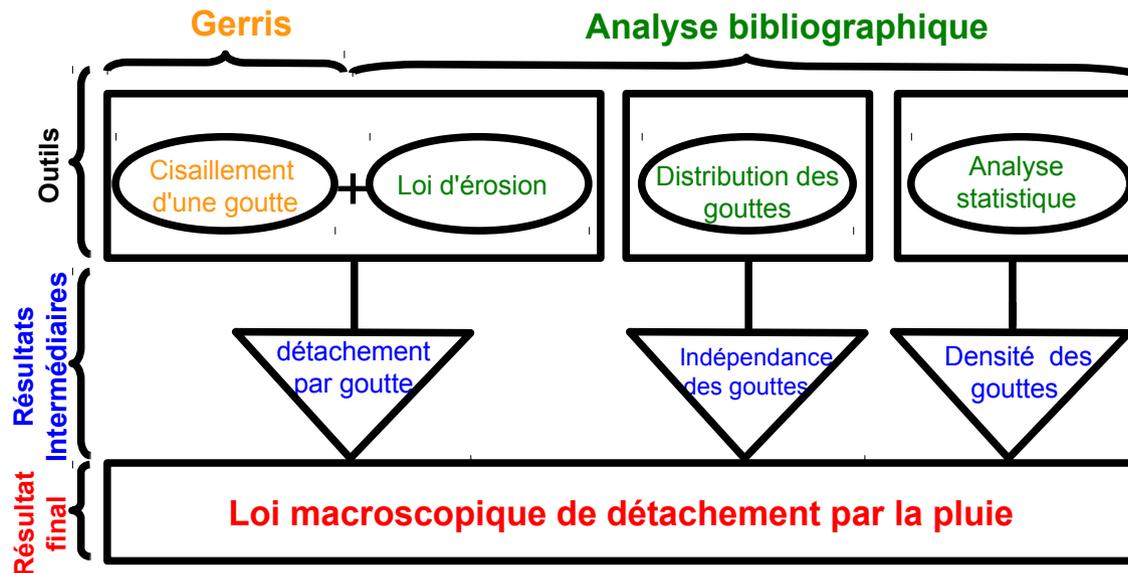
$$N_v(D) = N_0 \exp(-\lambda D), \quad \lambda = 4.1I^{-0.21}$$

3. Indépendance des gouttes de pluie

Pendant le détachement,
gouttes **quasiment**
indépendantes



Possibilité de **sommer**
les détachements des
gouttes individuelles



1 goutte →
$$d_s(D) = 2\pi M \int_0^{tmax} \int_0^{Rmax} (\tau_D - \tau_c) r dr dt$$

Somme sur le nombre de gouttes de **taille D**

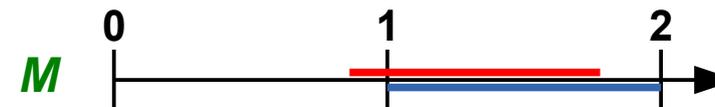
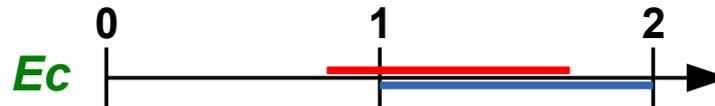
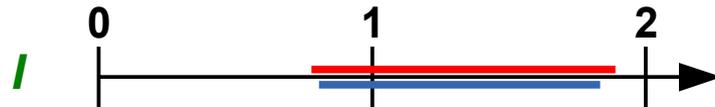
$$w_s(D) = d_s(D) Na(D)$$

Somme sur toutes les **tailles**

$$D_s = \sum_{D=D_{min}}^{D_{max}} w_s(D)$$

3. Résultat : Loi de détachement pour la pluie

➤ $D_s = A F^B$ $F = I, E_c, M$



➤ **Limites** : Non prise en compte

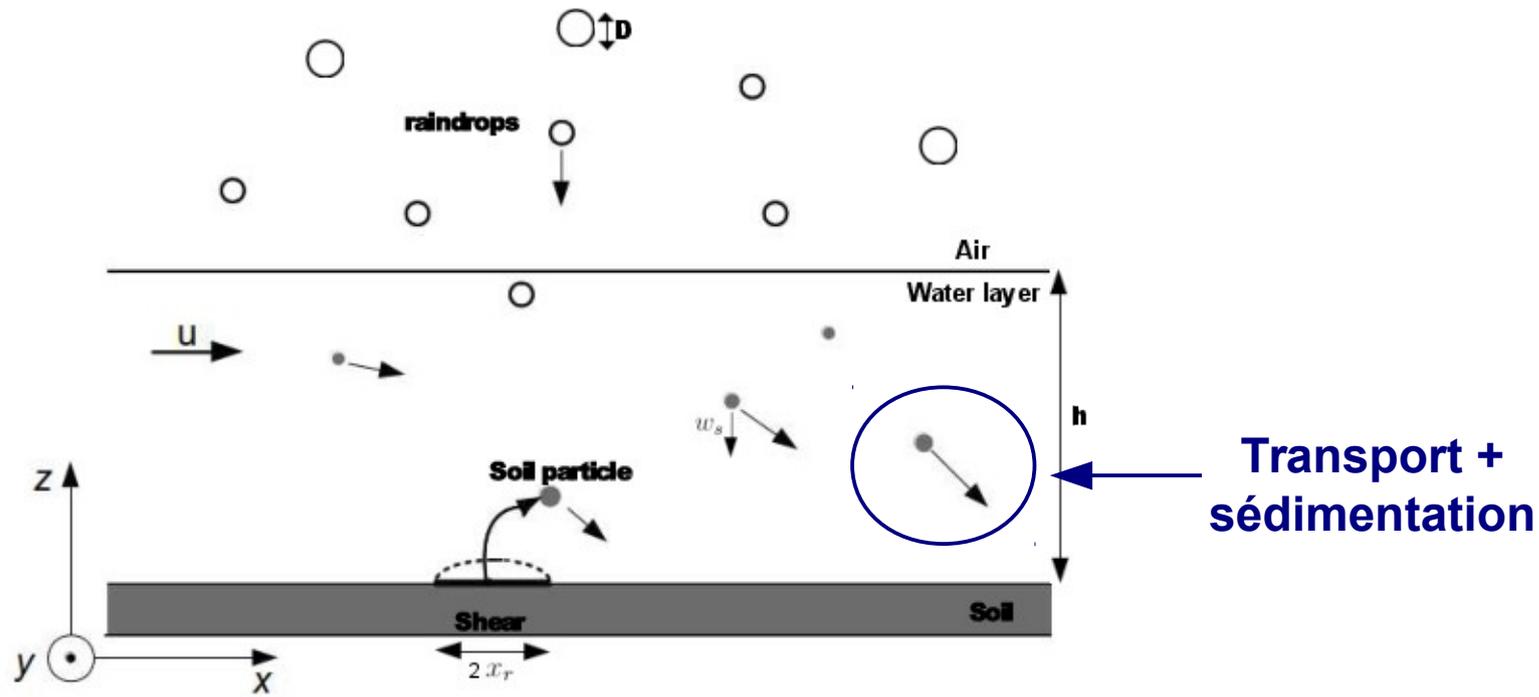
- de la rugosité du sol
- du type de sol
- du type de particules
- de la cohésion des particules

Gerris

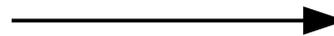
Littérature

(Salles2000b, Nearing1989)

Effet des gouttes sur le transport des particules du sol



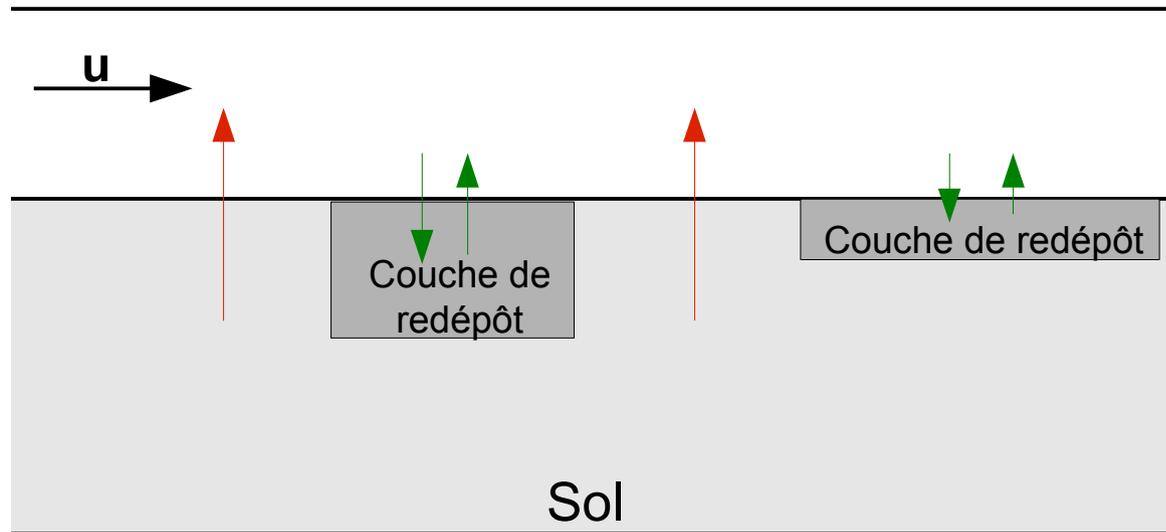
Forte interaction entre les particules du sol et les gouttes de pluie



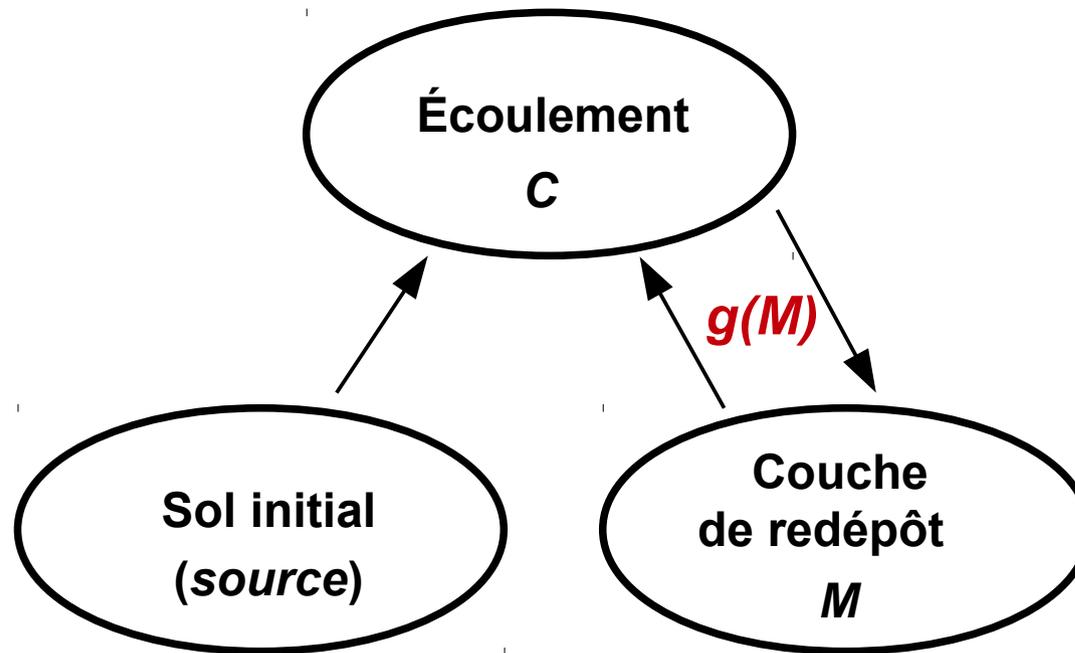
Approche de **sommation pas valable**

Modélisation numérique ?

B. Modélisation du phénomène d'érosion



Approche de modélisation choisie : Équations de transfert



- Système qui évolue vers un **état d'équilibre** où $C=g(M)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(qC)}{\partial x} = \frac{1}{ts}(g(M) - C) + source \\ \frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{1}{ts}(g(M) - C) \end{array} \right.$$

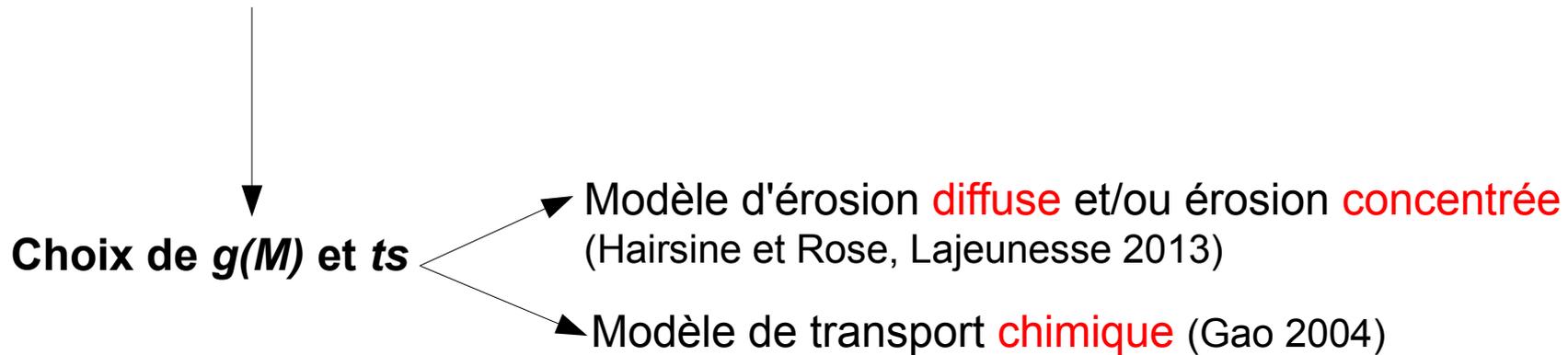
- $g(M)-C$: **écart à l'équilibre**

- ts : **temps de relaxation** pour atteindre l'état d'équilibre

1. Avantages

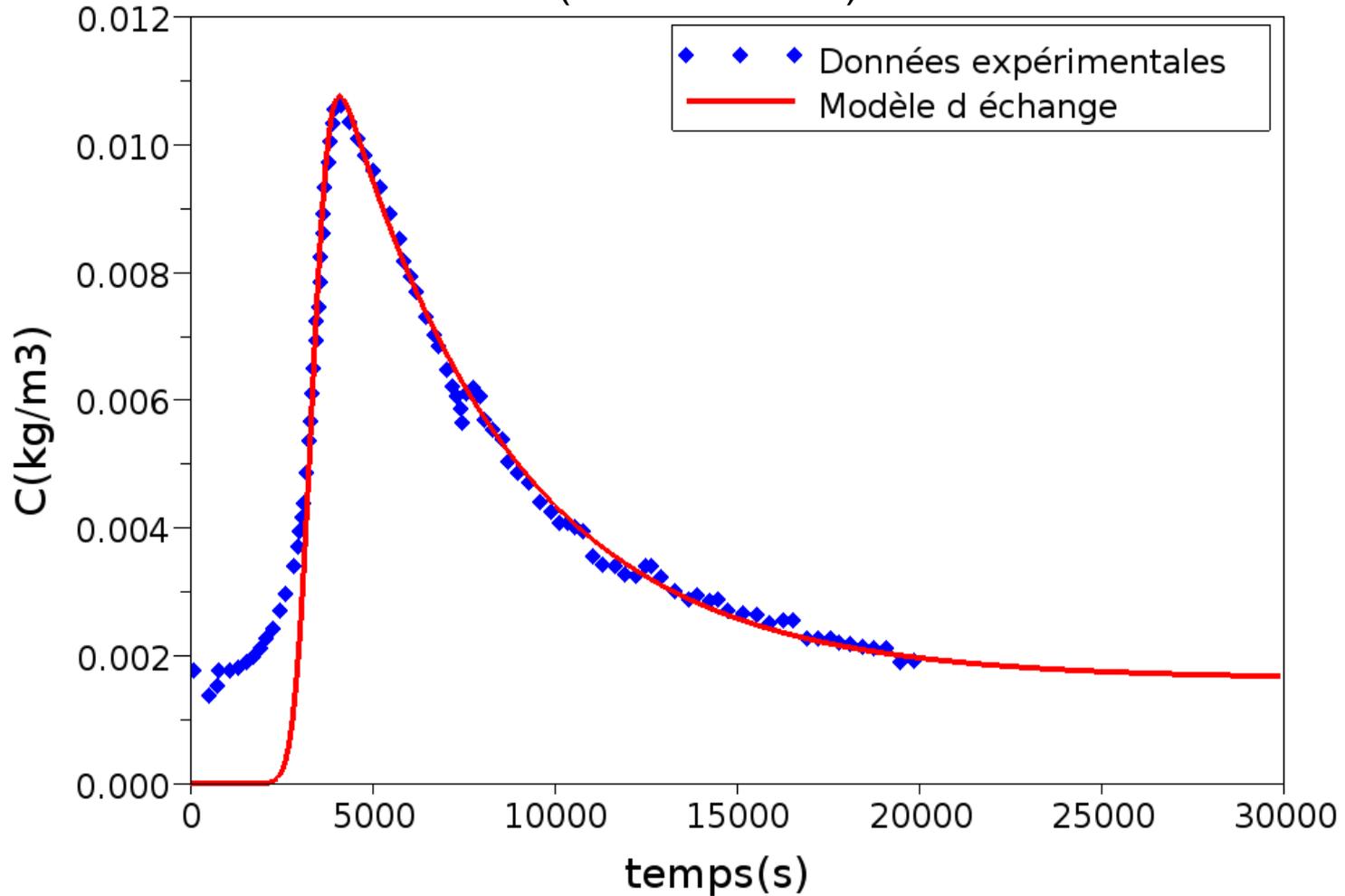
- Formulation **générale** des équations d'érosion

Englobe des modèles d'échange déjà existants



➤ Comparaison avec des données expérimentales

(Ganaoui 2004)



Erosion concentrée au **laboratoire**

× **Limite du modèle** : $g(M)$ et t_s pas définis d'avance

2. Érosion diffuse

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(qC)}{\partial x} = \frac{1}{ts}(g(M) - C) + source \\ \frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{1}{ts}(g(M) - C) \end{cases}$$

Modèles d'érosion **existants** sont **linéaires** : $g(M_i) = K_i M_i$
(Hairsine et Rose)

K_i = énergie d'interaction
entre classes de particules

Érosion diffuse : K_i et $ts = f(v_i)$
 v_i = vitesse de sédimentation

Problème

La fonction $g(M)$ ne considère pas
l'**interaction** entre gouttes et
particules

Elle **décrit mal** le processus
d'échange

3. Pistes explorées

→ Tester des modèles d'échange $g(M)$ non linéaires

ET/OU

Trouver la **bonne fonction** qui colle avec les données expérimentales

→ Maintenir la linéarité de $g(M)$ et **mieux calibrer** K_i

Expérience Labo en cours de Montage

Objectif : Évaluer l'**effet des gouttes** sur la **sédimentation** des particules

Étude de l'érosion diffuse : Objectifs

- Mieux comprendre le **rôle des gouttes** de pluie sur l'érosion des sols
- Proposer une loi **d'interaction gouttes** de pluie et **écoulement mince**

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(qC)}{\partial x} = \frac{1}{ts}(g(M) - C) + \underline{\text{source}} \\ \frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{1}{ts}(g(M) - C) \end{array} \right.$$

{ Pas d'interaction gouttes
Loi de détachement

{ Forte interaction gouttes
Nature ?

Perspectives

- **Coder** l'équation d'érosion dans le logiciel **FullSWOF**
- **FullSWOF** : logiciel **Saint-Venant**, **C++**
- Schéma numérique : **Volume finis**
- Assurer les conditions de **stabilité** et de **convergence**

Merci pour votre attention