

Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle

Guillaume Nord



RIDES – ECCO/PNRH 2003-2006

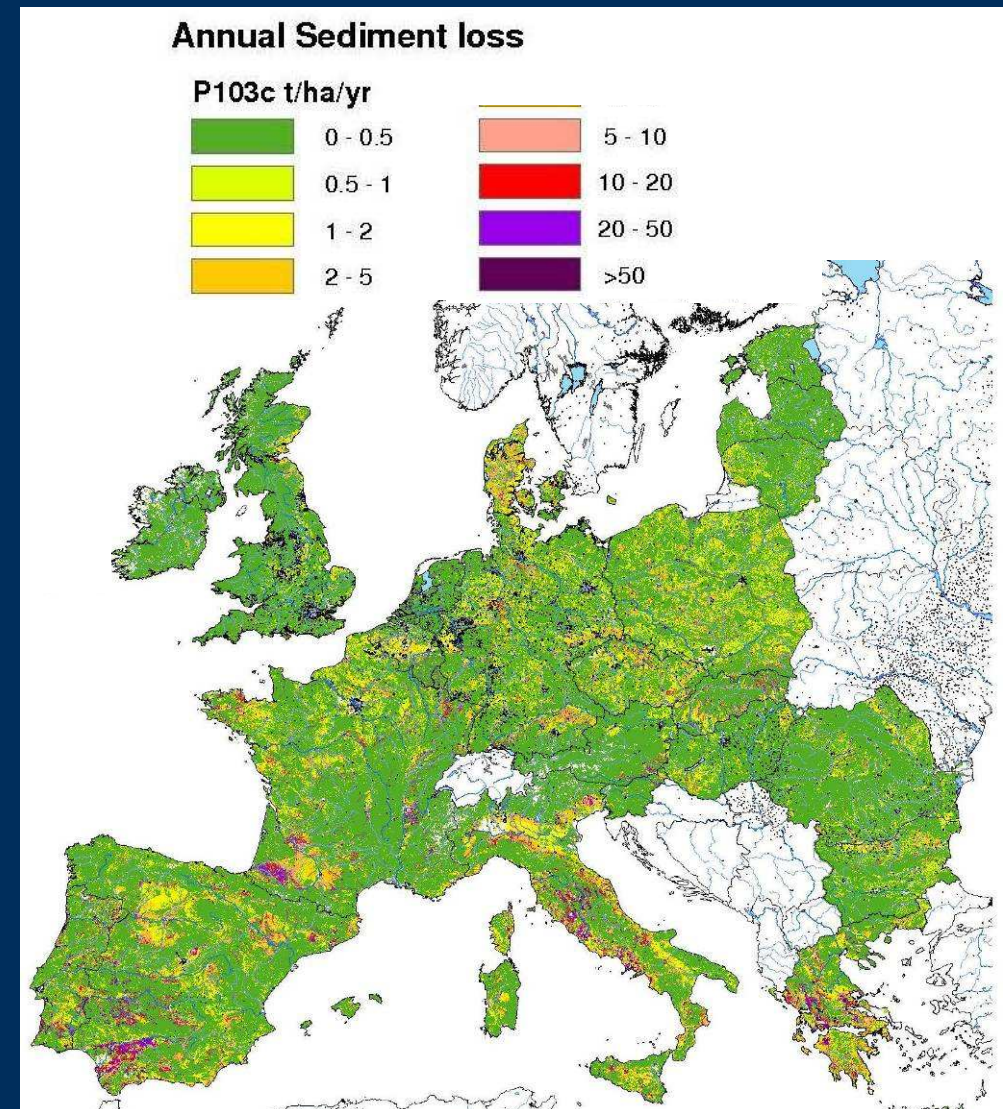
Dir. de thèse : M. Esteves

le 14 sept. 2006

L'érosion hydrique en Europe

Problème rencontré dans toute l'UE

- une surface équivalente à la moitié de la France (260 000 km²) souffre à différents degrés de gravité de l'érosion hydrique
- L'érosion hydrique = la menace principale à la ressource en sol en Europe
- Législation communautaire: Directive « Sols » et Directive cadre sur l'eau : mesures correctives à la dégradation des sols et de la qualité de l'eau



Source : The PESERA map

Impacts de l'érosion hydrique

- Impacts LOCAUX
 - Réduction de la qualité des sols
 - Réduction de la capacité d'absorption des sols



Source : Soil Erosion Site

- Impacts à l'AVAL
 - Mouvements de sédiments et polluants associés aux sédiments fins dans les cours d'eau (contamination de l'eau potable)
 - Sédimentation (remplissage des barrages)

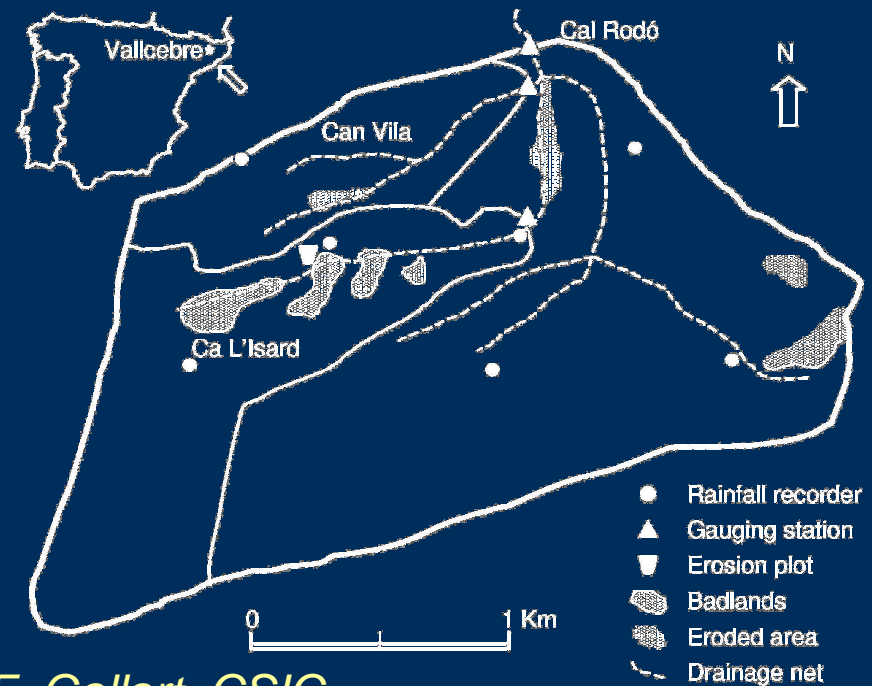
L'étude de l'érosion hydrique à l'échelle des petits bassins versants (~ km²)

- Une échelle spatiale stratégique :
 - Transition entre les écoulements de surface et le réseau de drainage
 - **Discontinuités spatiales et temporelles** du transfert de sédiments depuis les versants jusqu'aux cours d'eau
 - Référence pour les gestionnaires de l'environnement

→ Échelles spatiales imbriquées

2 approches complémentaires:

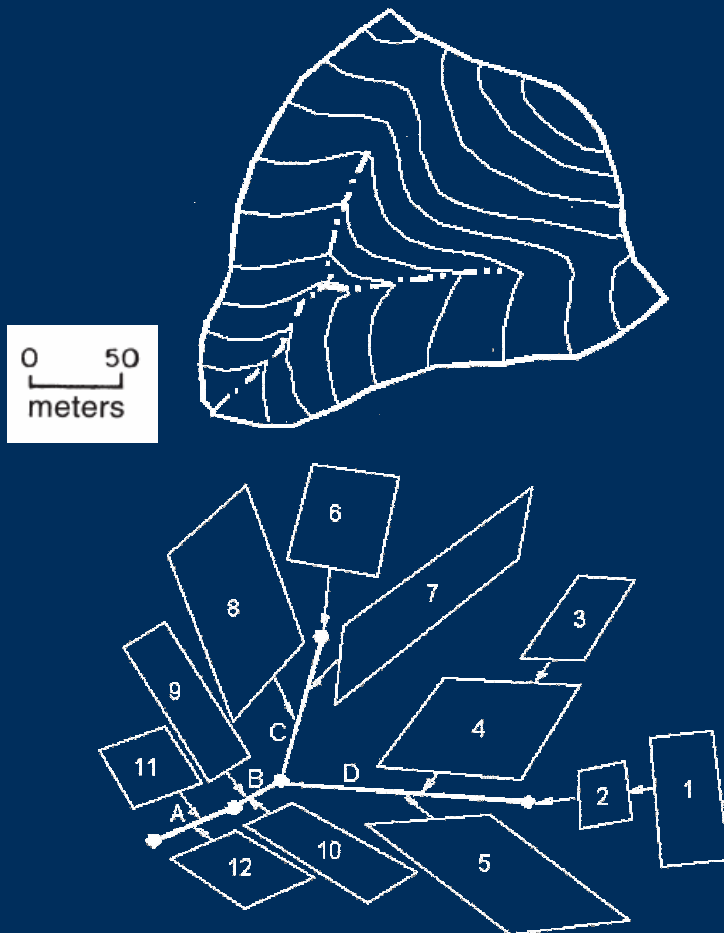
- L'observation
- La modélisation



Source : F. Gallart, CSIC

Constats et enjeux de la modélisation

Modèles de versants et de bassins versants

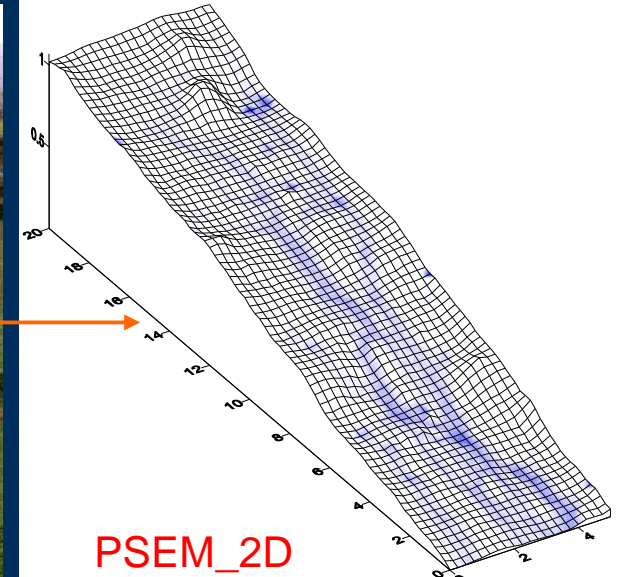
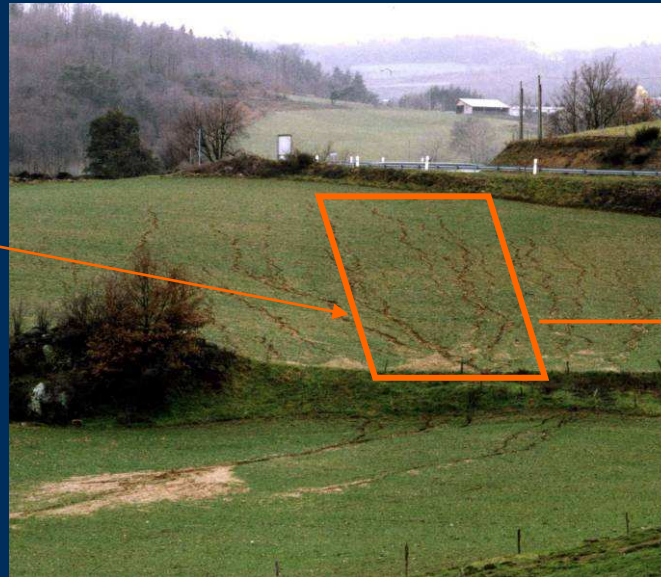
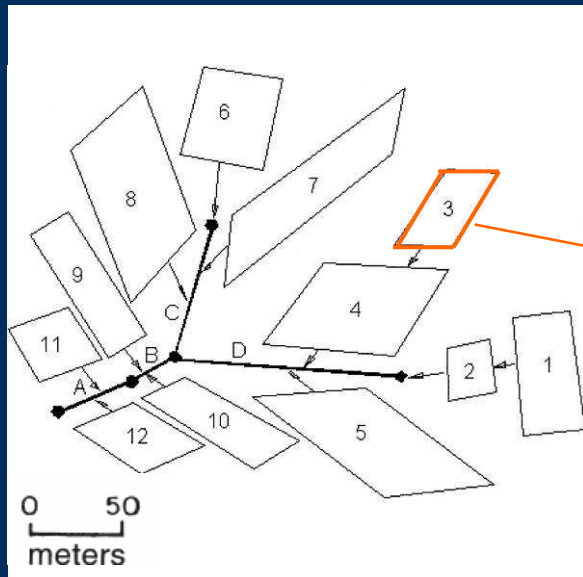


- Constats (Jetten et al. 1999, 2003)
 - Résultats relativement bons pour les volumes ruisselés à l'exutoire et peu satisfaisants pour les pertes en sol (même après calage!!)
 - Jeux de données spatialisés limités pour caler et évaluer les modèles
- Enjeux
 - Fournir des modèles plus fiables pour évaluer les impacts de l'érosion localement et à l'aval
 - Mieux estimer les flux de sédiments qui quittent les versants pour entrer dans le réseau hydrographique

Wepp, Kineros, Eurosem
LISEM, EROSION_3D, Shetran

Nos objectifs

- Améliorer la représentation des écoulements de surface sur les versants
- Prendre en compte la dynamique spatiale et temporelle des processus d'érosion sur les versants (**érosion diffuse + érosion concentrée**)



Élément de discrétisation
des modèles de BV

Élément d'espace

Échelle locale

➔ Construction d'un modèle 2D à base physique
de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle

Les questions clés

- Quels processus choisir dans le **modèle**, comment les représenter et les évaluer ?
- Quelles sont les **caractéristiques granulométriques** des particules mobilisées et comment évoluent-elles au cours du transport ?
- Comment évaluer les paramétrisations actuelles de **l'érosion en rigole** avec ce modèle ?
- Les représentations actuelles du **transport** de particules par un écoulement concentré sont-elles appropriées ?
- Quelles **simulations** peut-on réaliser pour réfléchir au changement d'échelle de la parcelle au petit bassin versant ?

Plan de l'exposé

- Le modèle PSEM_2D (Plot Soil Erosion Model)
- La granulométrie des particules érodées (analyse de données)
- L'érosion en rigole (analyse de données et modélisation)
- Le transport de particules (laboratoire)
- Une expérimentation numérique

**Quels processus choisir dans le modèle,
comment les représenter et les évaluer ?**

→ Le modèle PSEM_2D (Plot Soil Erosion Model)

La démarche

- Objectif
 - Construire un modèle 2D à base physique de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle
- Méthodologie
 - Sélection dans la bibliographie des formulations pour représenter les processus d'érosion
 - Conceptualisation du modèle d'érosion
 - Couplage du modèle d'érosion avec le modèle de ruissellement développé par *Esteves et al. (2000, J. Hydrol.)*
 - Évaluation préliminaire et analyse de sensibilité à l'aide de données issues de la littérature

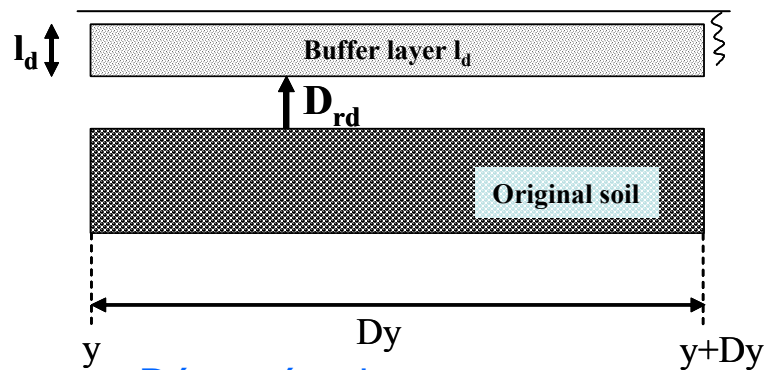
Les grandes lignes de PSEM_2D

- Le modèle de ruissellement développé par *Esteves et al. (2000, J. Hydrol.)*
 - Le ruissellement est hortonien. Il apparaît quand l'intensité de la pluie excède le taux d'**infiltration** (équation de Green et Ampt, 1911)
 - Le **ruissellement** est calculé en résolvant les équations de Barré de Saint Venant. Le **frottement** est estimé avec l'équation de Darcy-Weisbach.
- Le modèle d'érosion
 - Continuité spatiale entre **érosion diffuse** et **érosion concentrée**
 - Taille de particules **unique** (diamètre médian D_{50}) : $0.001 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$
 - Transport des particules en **suspension** (mouvement régi par une équation de conservation de la masse)
 - **Couplage** entre processus hydrologiques et processus d'érosion

Conceptualisation

$$\tau < \tau_c$$

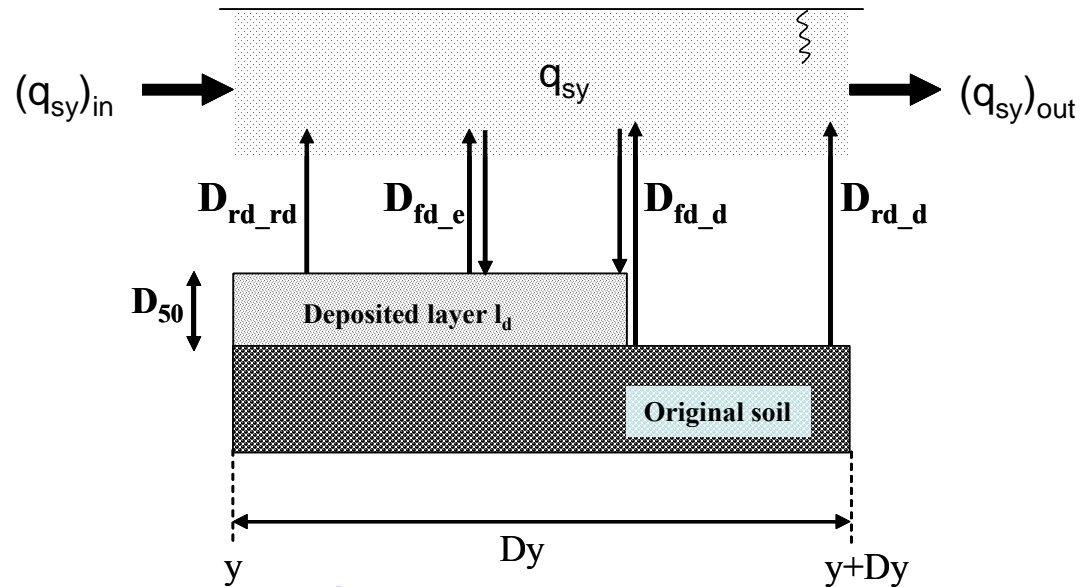
(τ_c : contrainte de cisaillement critique d'une particule non-cohésive)



- Désagrégation et détachement (D_{rd})

l_d : couche tampon ; couche de dépôt

$$\tau > \tau_c$$

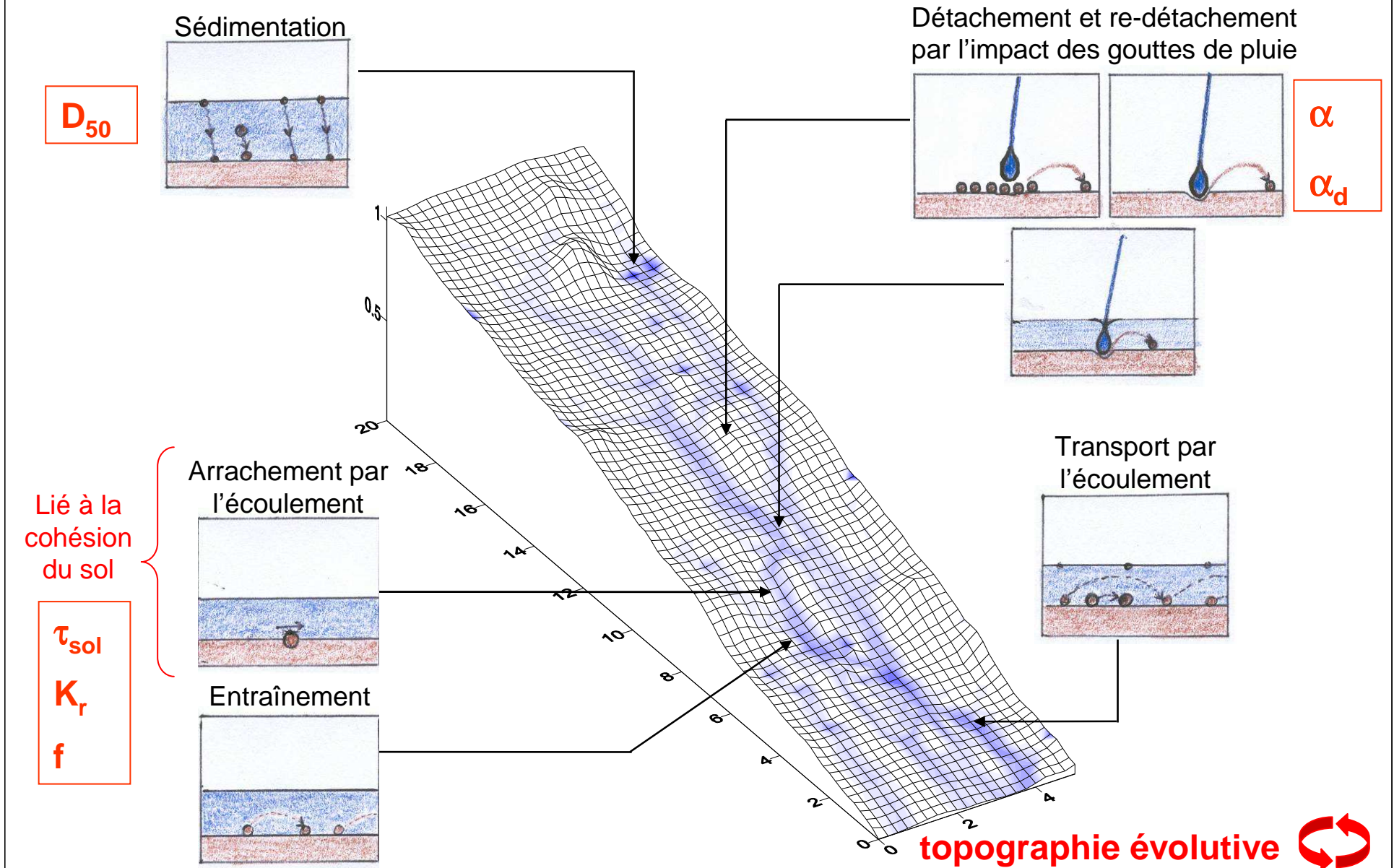


- Détachement : D_{rd_d}
- Arrachement : D_{fd_d}
- Re-détachement : D_{rd_d}
- Entraînement : D_{fd_e}
- Dépôt : D_{fd}
 - discontinu : quand $q_s > T_c$
 - continu

Paramétrisations des processus d'érosion

- Version initiale (*Nord et Esteves, 2005, WRR*)
 - Action de la pluie (*Li, 1979 modifié*)
 - Arrachement par l'écoulement et capacité de transport (*Foster et al., 1995*)
 - Dépôt discontinu (*Foster et al., 1995*)
 - Couche de sédiments non cohésifs (*Hairsine and Rose., 1992*)
- Évolution 1 : le transport des sédiments est représenté par 4 équations différentes (*Nord et Esteves, 2006, soumis, WRR*)
 - *Yalin, 1963* (shear stress)
 - *Low, 1989* (stream power)
 - *Govers, 1992* (unit stream power)
 - *Govers, 1992* (effective stream power)
- Évolution 2 : prise en compte d'un dépôt continu (*Hairsine and Rose, 1992*)

Les composants du modèle

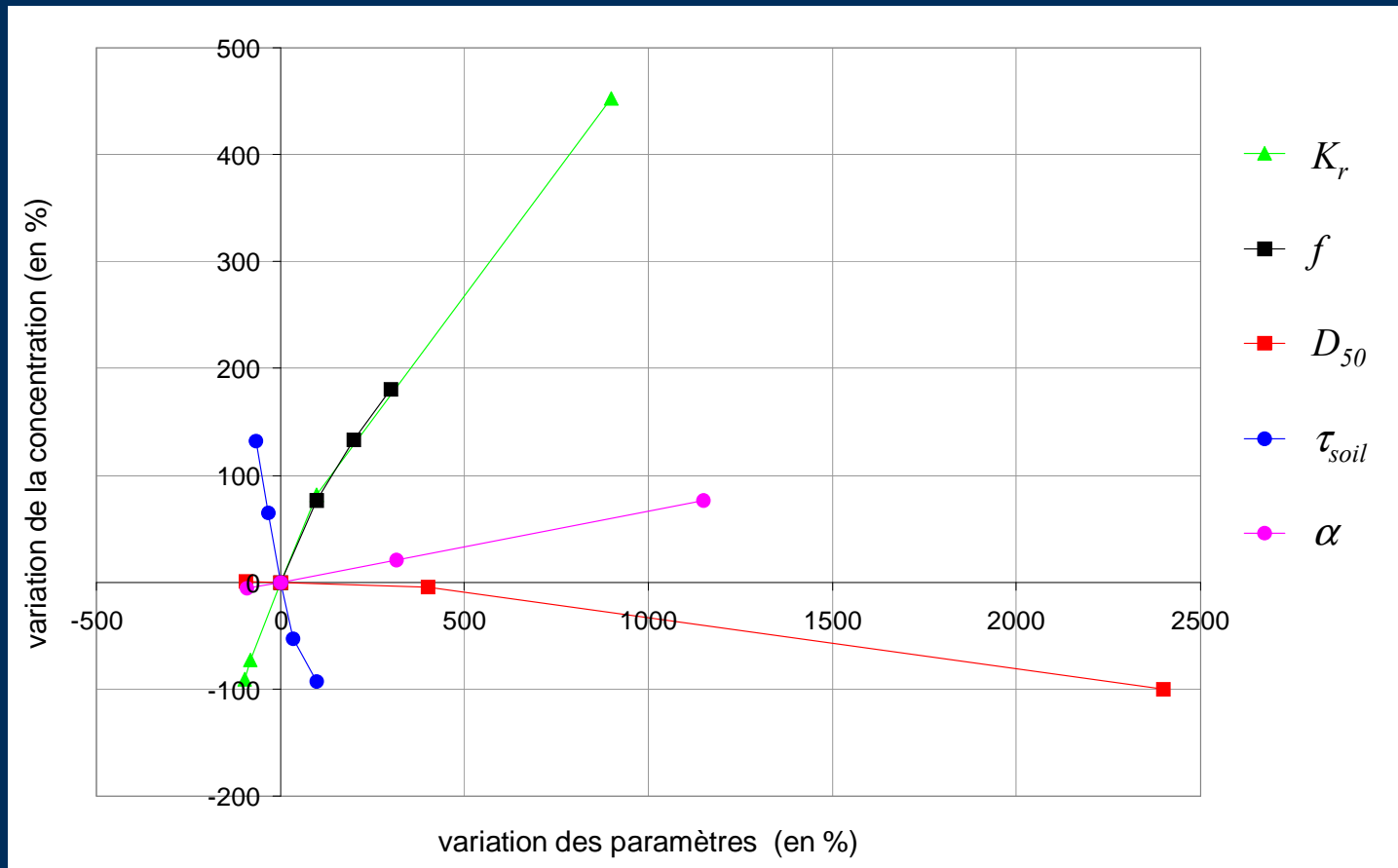


Les données d'entrée à fournir

- Le modèle a besoin des données suivantes:
 - Pentes et topographies (Modèle Numérique de Terrain)
 - Carte de la distribution des types de sol
 - Paramètres d'infiltration (h_f , déficit de saturation en eau du sol, épaisseur de la croûte, K_c , K_s)
 - Carte des coefficients de frottement de Darcy-Weisbach (f)
 - Paramètres d'érosion (K_r , τ_{soil} , D_{50} , α , α_d)
 - Caractéristiques de la pluie (durée, intensité)

Résultats avec la version initiale du modèle

- Évaluation sur **surfaces planes** en utilisant les données de :
 - Kilinc et Richardson (1973) *Nord and Esteves (2005, WRR)*
 - Singer et Walker (1983)
- Analyse de sensibilité pour des gammes de valeurs de référence



**Quelles sont les caractéristiques
granulométriques des particules mobilisées
et comment évoluent-elles au cours du
transport ?**

**→ La granulométrie des particules érodées
(analyse de données)**

Propriétés des particules mobilisées

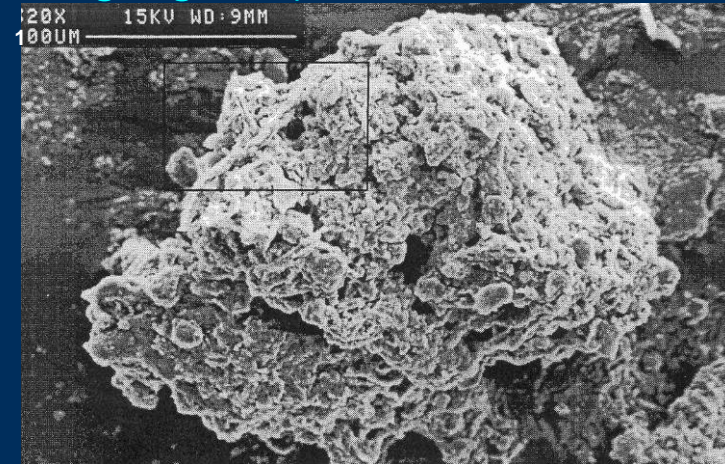
- Taille et densité des particules érodées

Particules élémentaires
(densité : 2.6 - 2.7)



Entre
0.001 mm
et 2 mm

Agrégats (densité : 1.5 – 2.2)



Source: Slattery and Burton (1997)

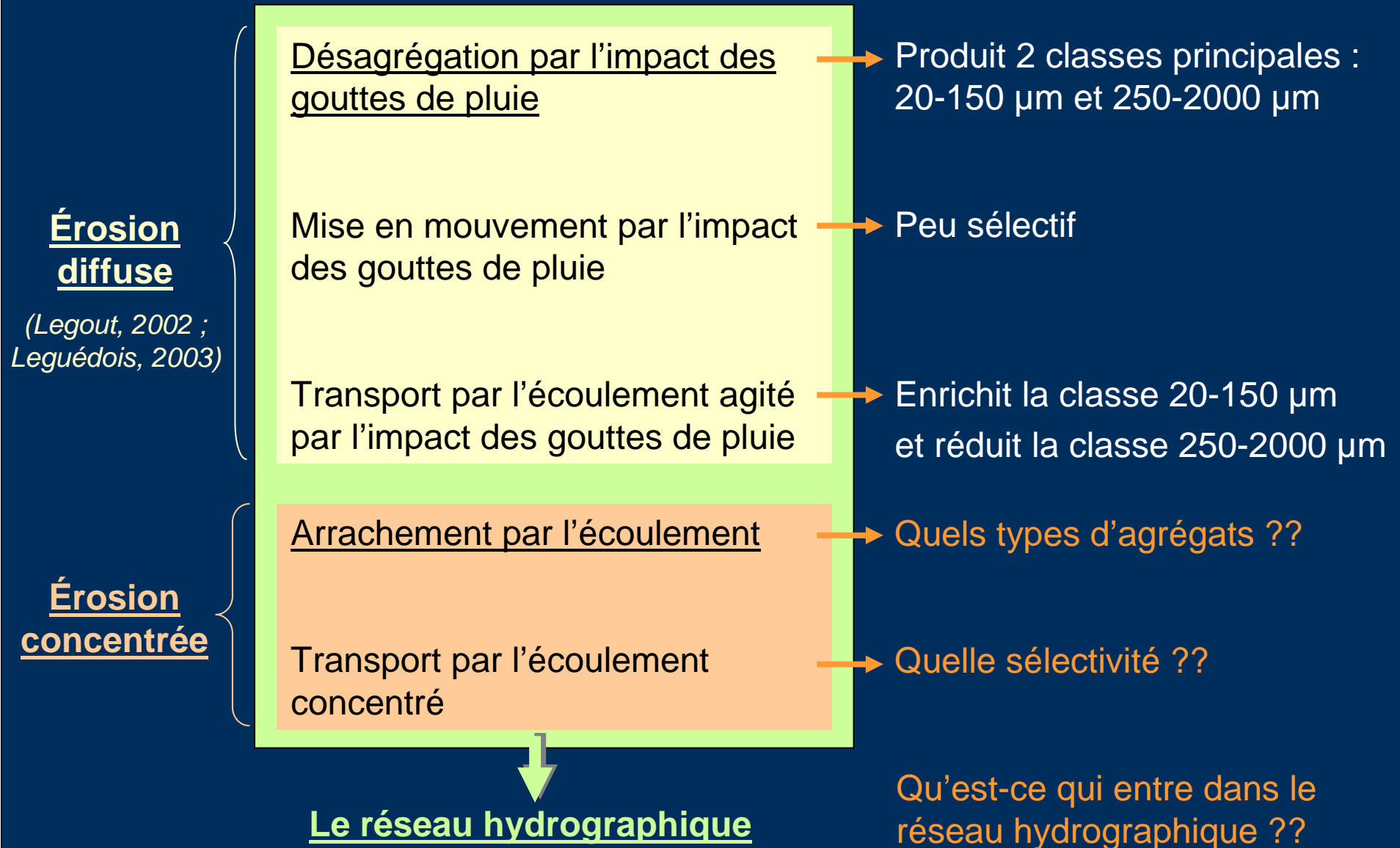
- Transport de particules : travailler en granulométrie non dispersée
- Texture du sol : travailler en granulométrie dispersée

Sélectivité granulométrique

Le versant

PROCESSUS

SELECTIVITE

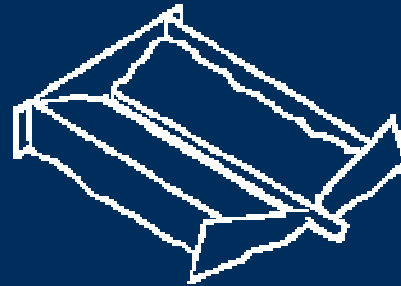


Données observées



0.25 m²

Leguédois (2003)
INRA Orléans



0.38 m²

Elliot et al. (1989)
WEPP database



Rigoles

9 m x 0.5 m

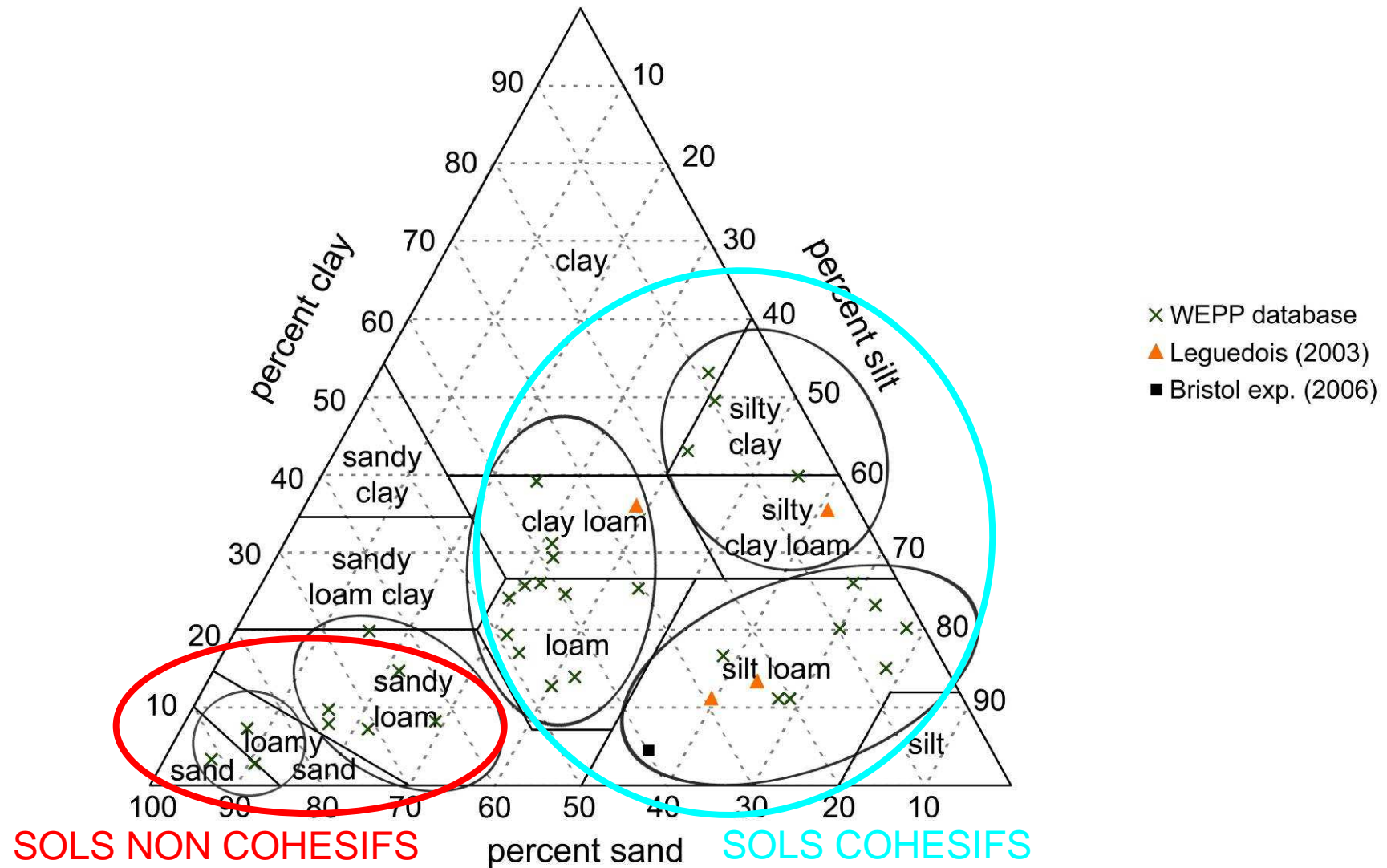


15 m²



5 m²

Analyse par groupes de texture

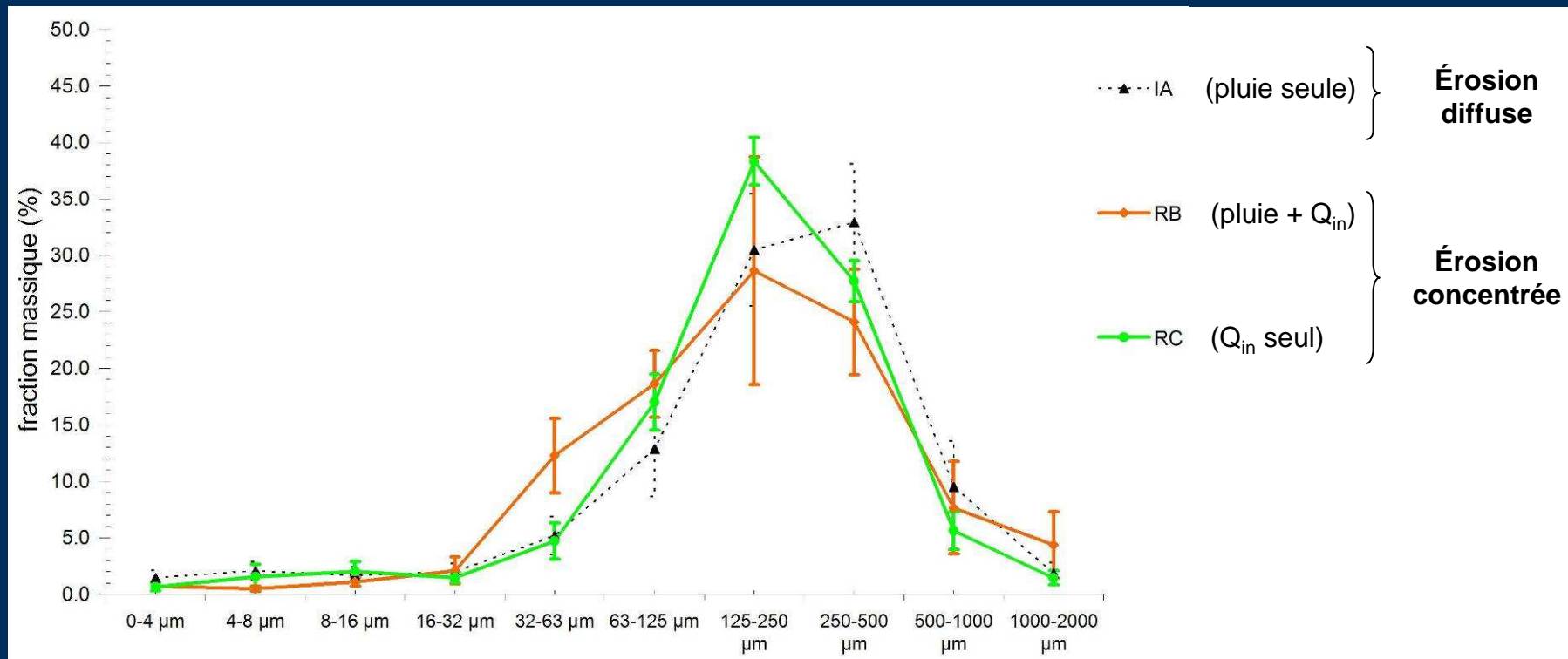


Résultats : sols non cohésifs

- Sols de type **loamy sand et sand**
- D_{50} particules exportées non dispersées $\approx D_{50}$ matrice de sol dispersée

D_{50} constant
↓
RA (pluie seule)
RB (pluie + Q_{in})
RC (Q_{in} seul)

Particules érodées = particules
élémentaires

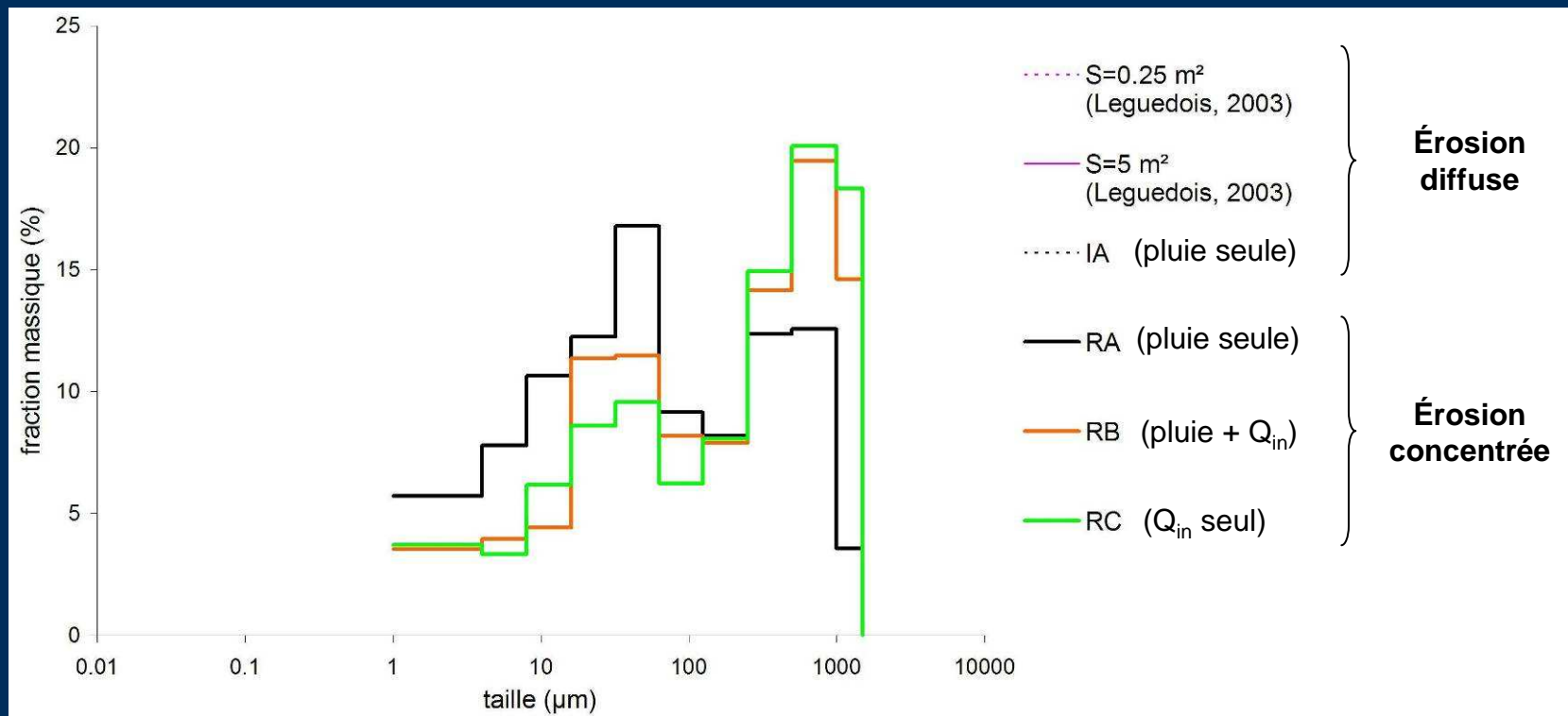


Résultats : sols cohésifs

- Sols de type **clay et silty clay**
- D_{50} particules exportées non dispersées $>$ D_{50} matrice de sol dispersée

D_{50} augmente ↓
RA (pluie seule)
RB (pluie + Q_{in})
RC (Q_{in} seul)

Particules érodées = agrégats +
particules élémentaires



Bilan

- Le transport par un écoulement concentré : peu sélectif
 - L'érosion diffuse : sélective
 - L'arrachement par l'écoulement : produit des particules plus grossières si le sol est cohésif lors de la formation des rigoles
 - On peut rechercher des relations entre les distributions granulométriques des particules exportées et les textures des sols initialement érodés :
 - Distributions unimodale, bimodale ou uniforme
 - Présence d'agrégats et/ou de particules élémentaires
- Faire les bonnes hypothèses de modélisation

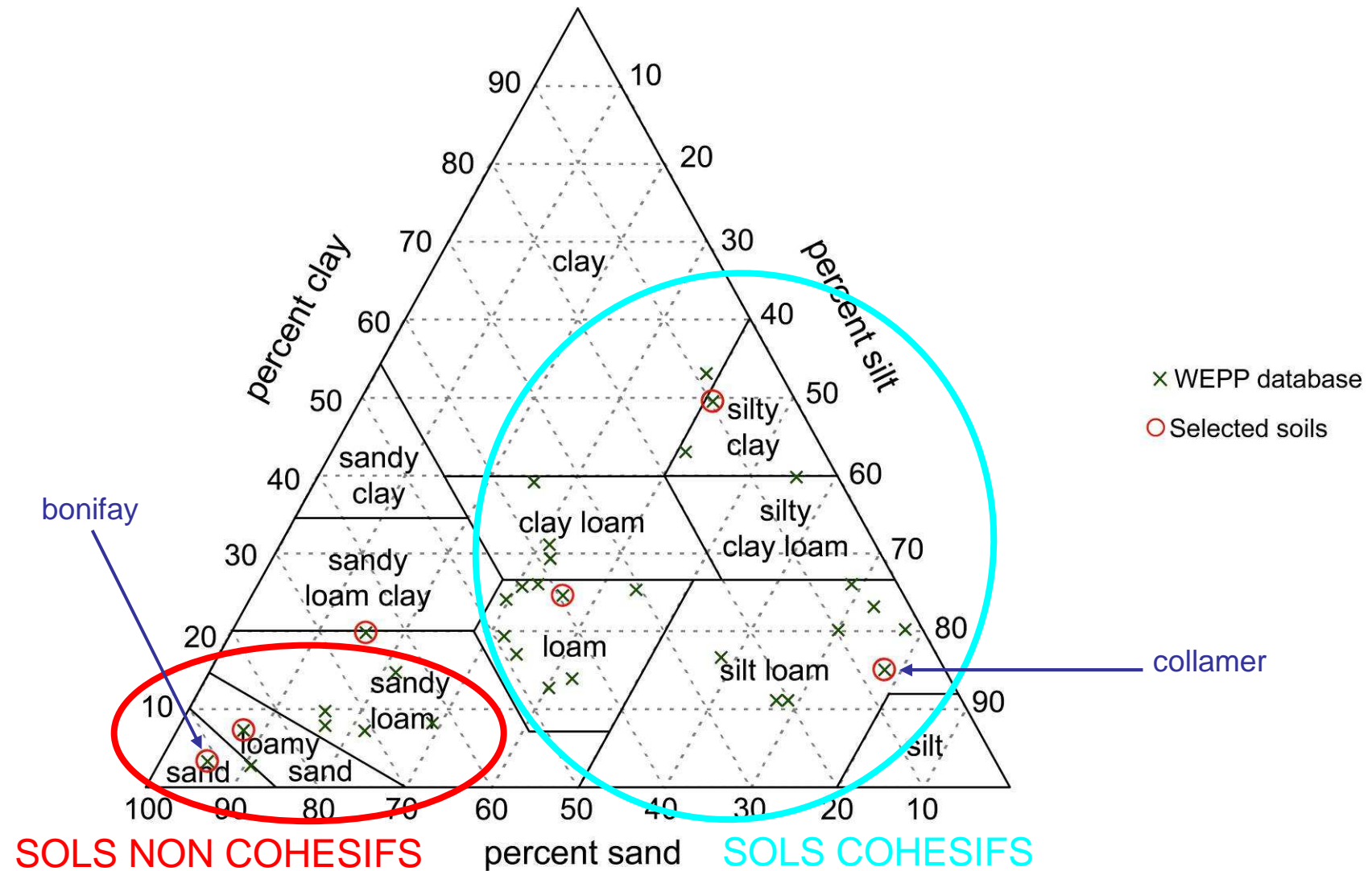
Comment évaluer les paramétrisations actuelles de l'érosion en rigole avec ce modèle ?

→ L'érosion en rigole (analyse de données et modélisation)

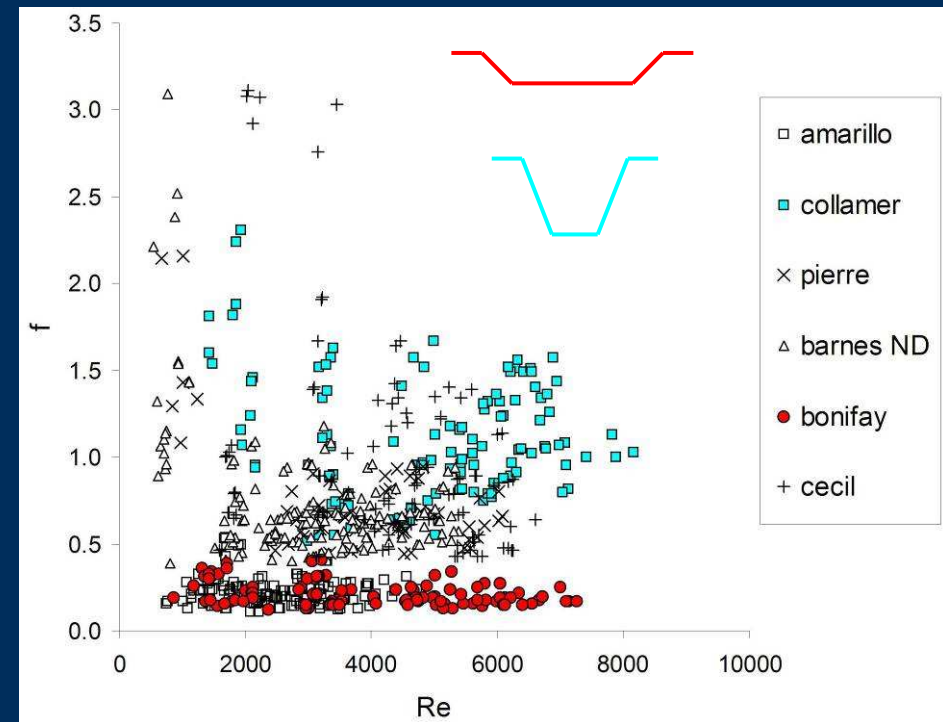
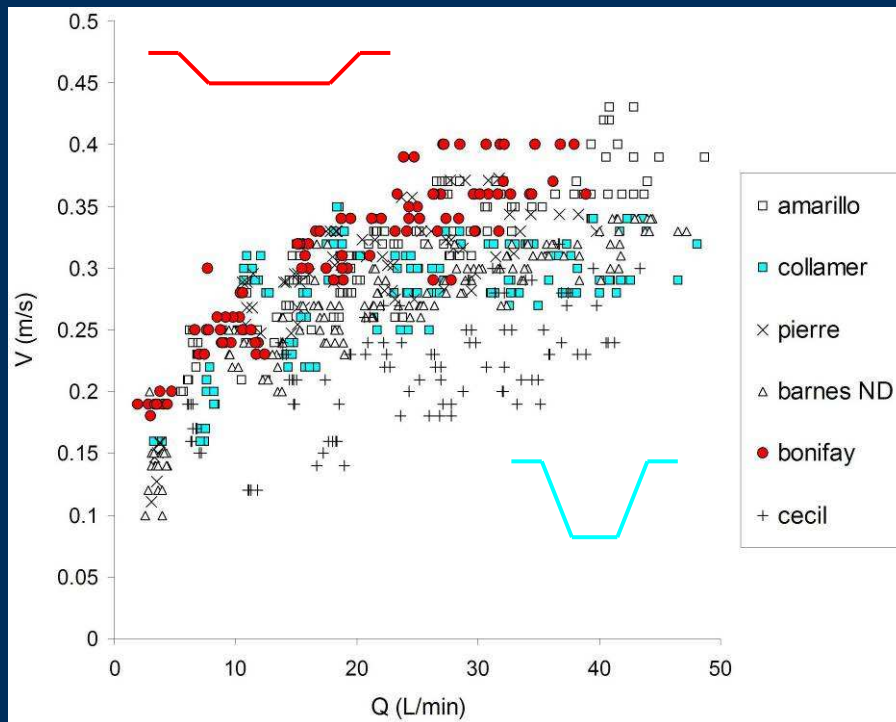
La démarche

- Objectif
 - Évaluer **1 modèle d'arrachement** à 2 paramètres (K_r , τ_{sol}) et **4 formules de capacité de transport** en utilisant PSEM_2D qui décrit les écoulements avec les équations de Saint-Venant 2D et qui assure le couplage entre l'hydraulique et les processus d'érosion.
- Méthodologie
 - Choix de 6 sols de texture très différentes dans la base de données WEPP
 - Analyse de données observées
 - Reproduction des débits et des vitesses dans les rigoles avec le modèle
 - Utilisation des paramètres K_r et τ_{sol} extraits de la base de données WEPP

Choix des sols

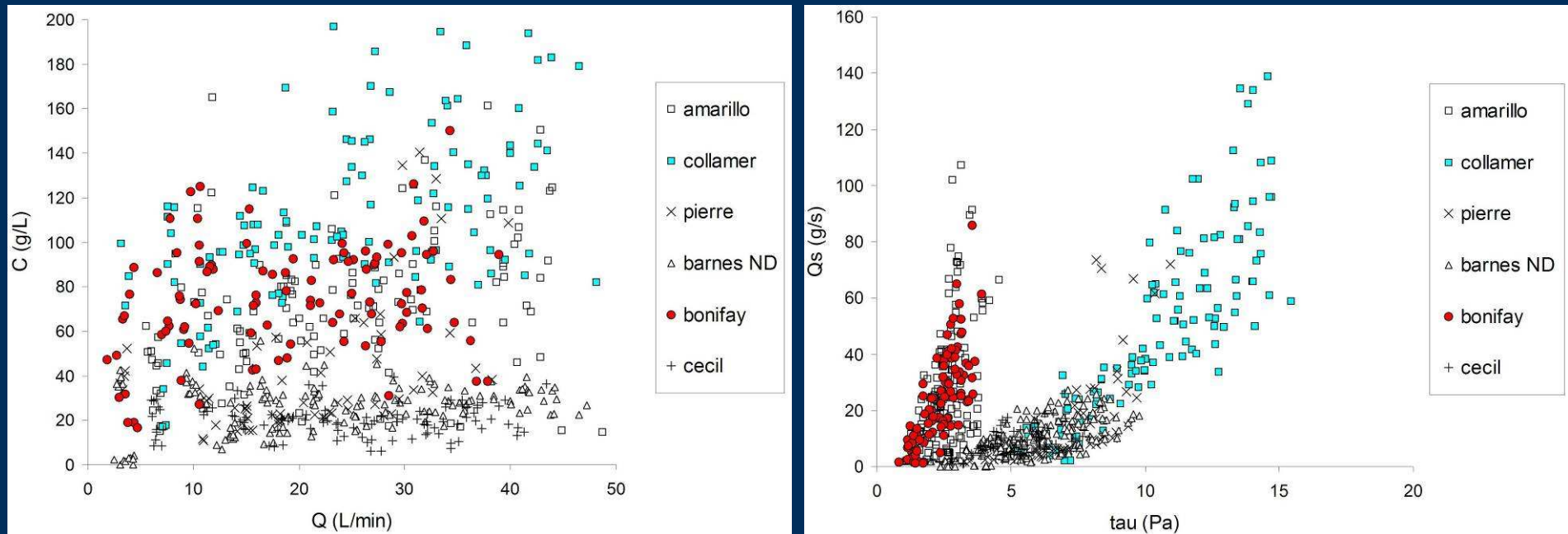


Analyse de données observées : hydraulique



- **sols non cohésifs** : rugosité de grain dominante (f faible et V élevé)
- **sols cohésifs** : rugosité de forme dominante (f élevé et V faible)

Analyse de données observées : érosion

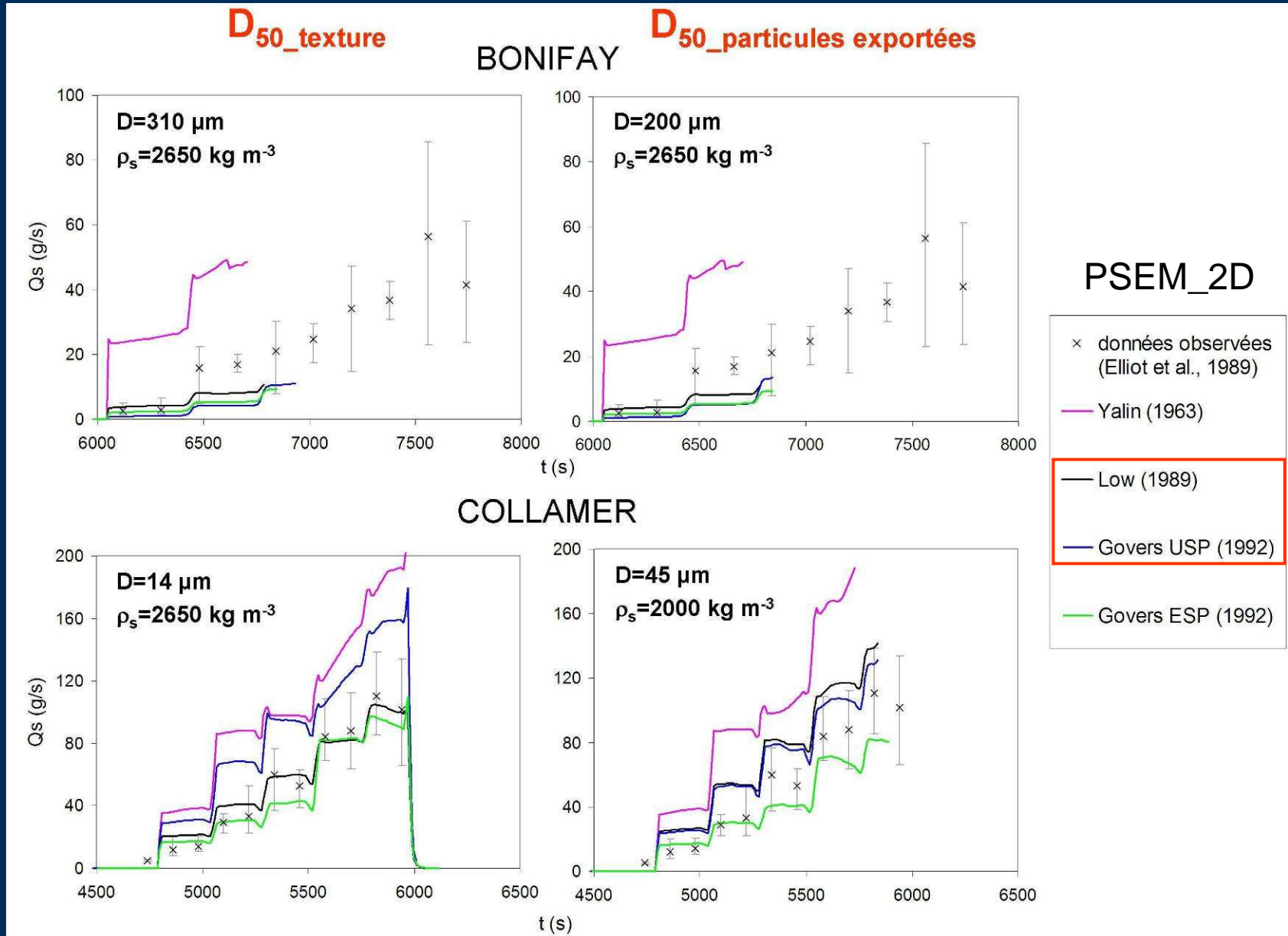


- Grande **dispersion** des données d'érosion
- Régimes d'érosion **limités par le transport** à l'exutoire des rigoles de 9 m de long
- Comportements différents pour les **sols cohésifs** et les **sols non cohésifs**

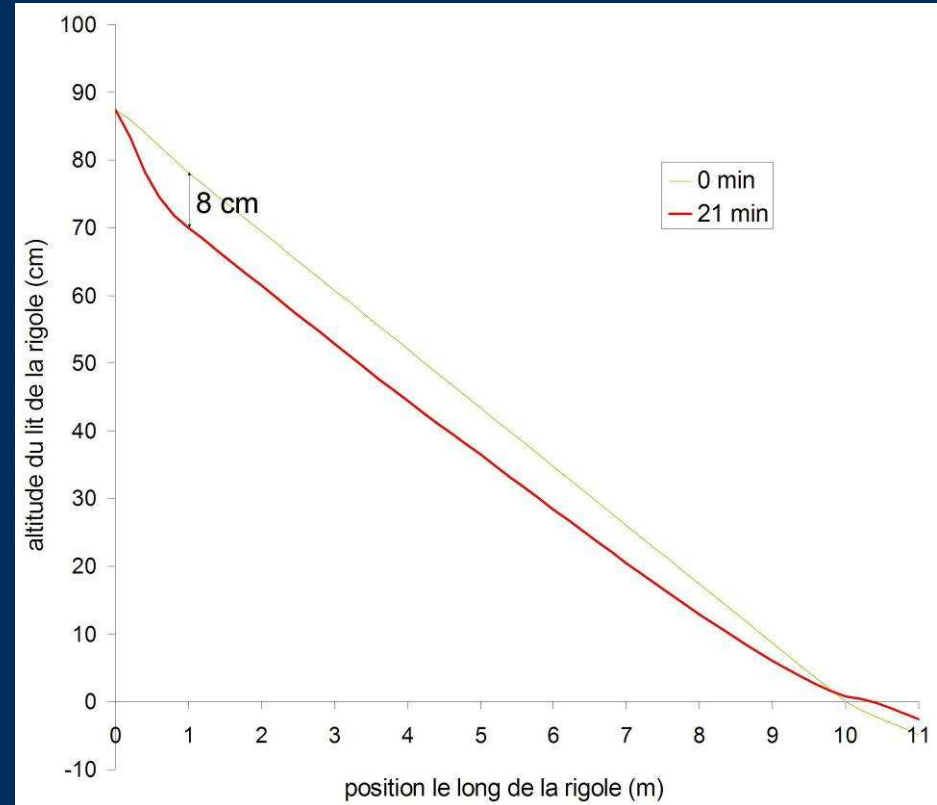
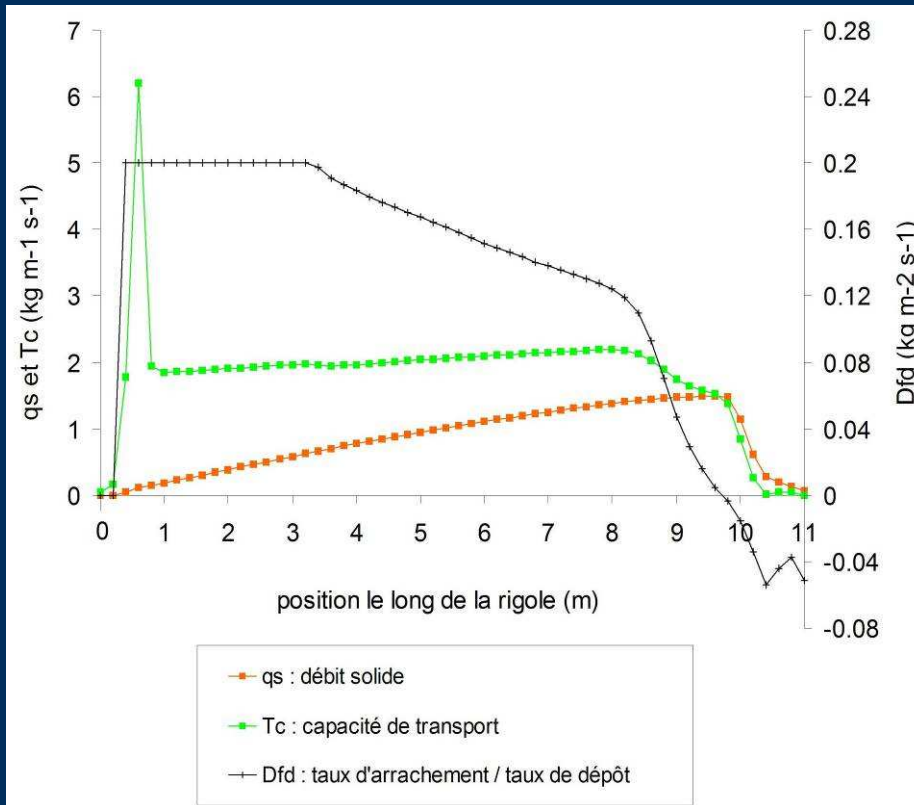
Évaluation de 4 formules de capacité de transport

Sol non cohésif

Sol cohésif



Évaluation du modèle d'arrachement pour un sol cohésif (le sol Collamer)



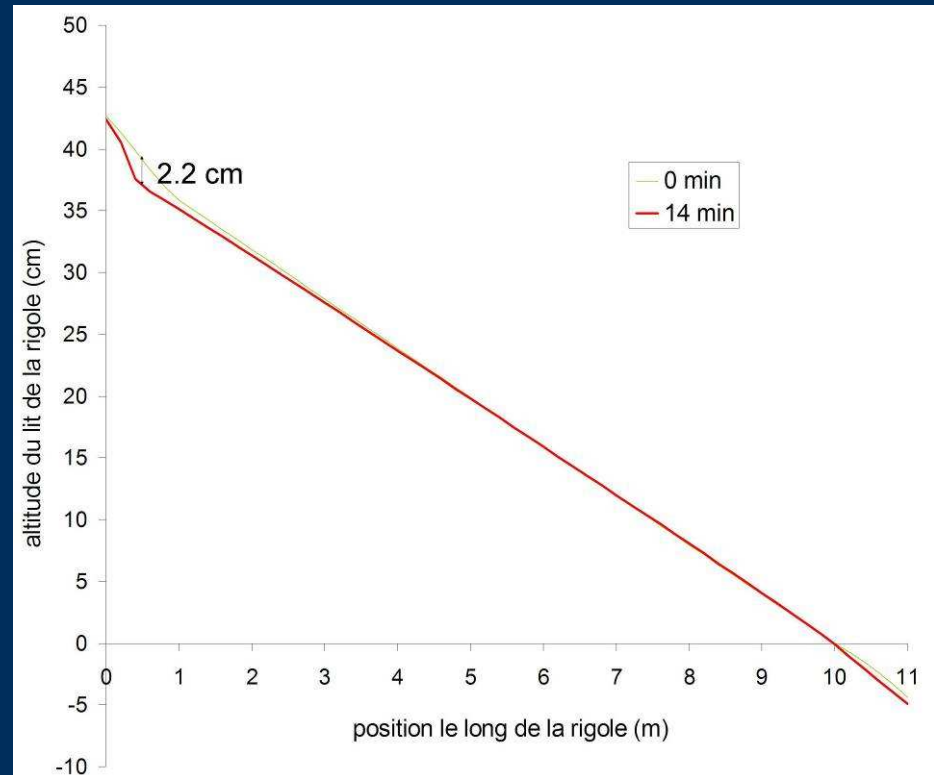
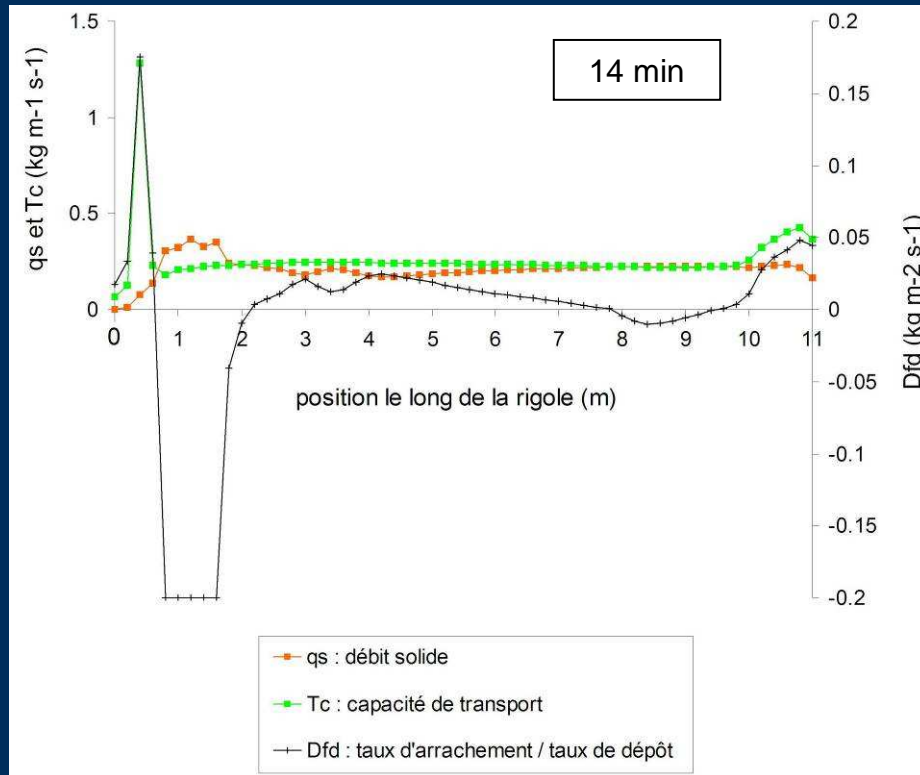
Modèle d'arrachement de *Foster et al. (1995)* avec :

$$K_r = 0.0215 \text{ s m}^{-1}$$

$$\tau_{\text{sol}} = 6.3 \text{ Pa}$$

Régime limité par le transport à l'aval

Évaluation du modèle d'arrachement pour un sol non cohésif (le sol Bonifay)



Modèle d'arrachement de *Foster et al. (1995)* avec :

$$K_r = 0.0157 \text{ s m}^{-1}$$

$$\tau_{\text{sol}} = 1.0 \text{ Pa}$$

Régime limité par le transport sur toute la longueur

Bilan

- Sols cohésifs et sols non cohésifs : des différences marquées sur l'hydraulique et l'érosion
- Deux formules de capacité de transport retenues :
 - sols cohésifs : *Govers (1992) Unit Stream Power*
 - sols non cohésifs : *Low (1989) Stream Power*
- Le couplage entre le modèle d'arrachement de *Foster et al. (1995)* et les équations de Saint venant en 2D :
 - est possible à condition que les pentes résultant de l'érosion ne soient pas trop fortes
 - permet de restituer la variété des régimes d'érosion observés par *Huang et al. (1996)*
 - doit être évalué en utilisant des données d'érosion complémentaires (profils en long d'érosion/dépôt)

Les représentations actuelles du transport de particules par un écoulement concentré sont-elles appropriées ?

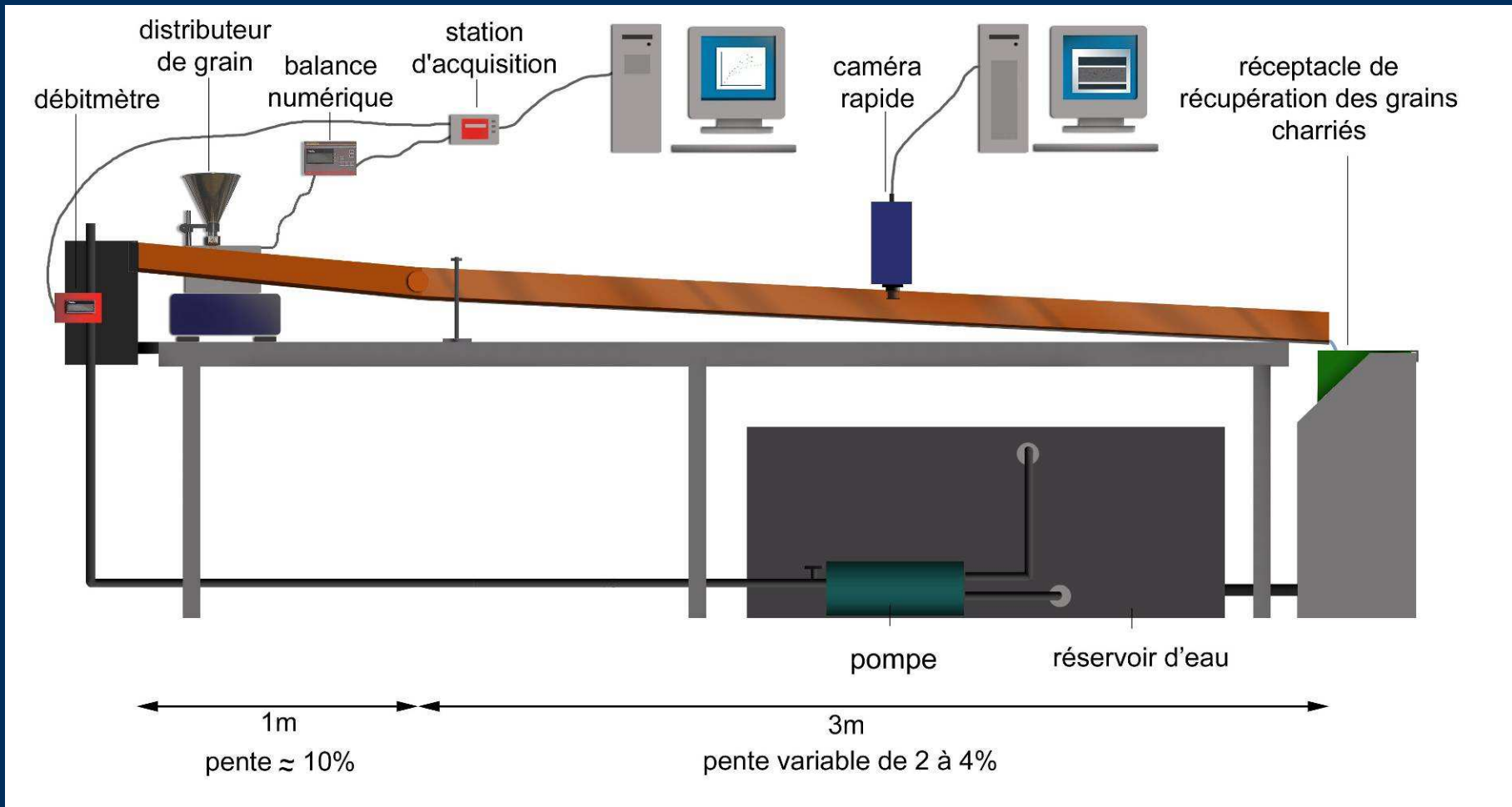
→ Le transport de particules (laboratoire)

La démarche

- Objectif
 - Mieux représenter le transport dans les modèles d'érosion à l'échelle du versant (densité du matériau, interaction entre suspension et charriage)
- Méthodologie
 - Expérience de laboratoire



Dispositif expérimental



Sable 400-600 μm

Brique pilée 400-600 μm

Brique pilée 400-600 μm
+ kaolinite (<10 μm)

Tableau récapitulatif

	Hydraulique du ruissellement	Transport solide 1	Transport solide 2	
Q (L/min)	[2.5 – 25]	[2.5 – 15]	[2.5 – 15]	[2.5 – 15]
Pente (%)	2 ; 4	2.2	2.2 ; 3 ; 4	4
Rugo (µm)	1 ; 70	70	70	70
Matériau charrié	×	Brique / sable	Brique / sable	Brique
Kaolinite en suspension (g/L)	×	×	×	7 ; 12 ; 41 ; 84

Mécanismes testés ?



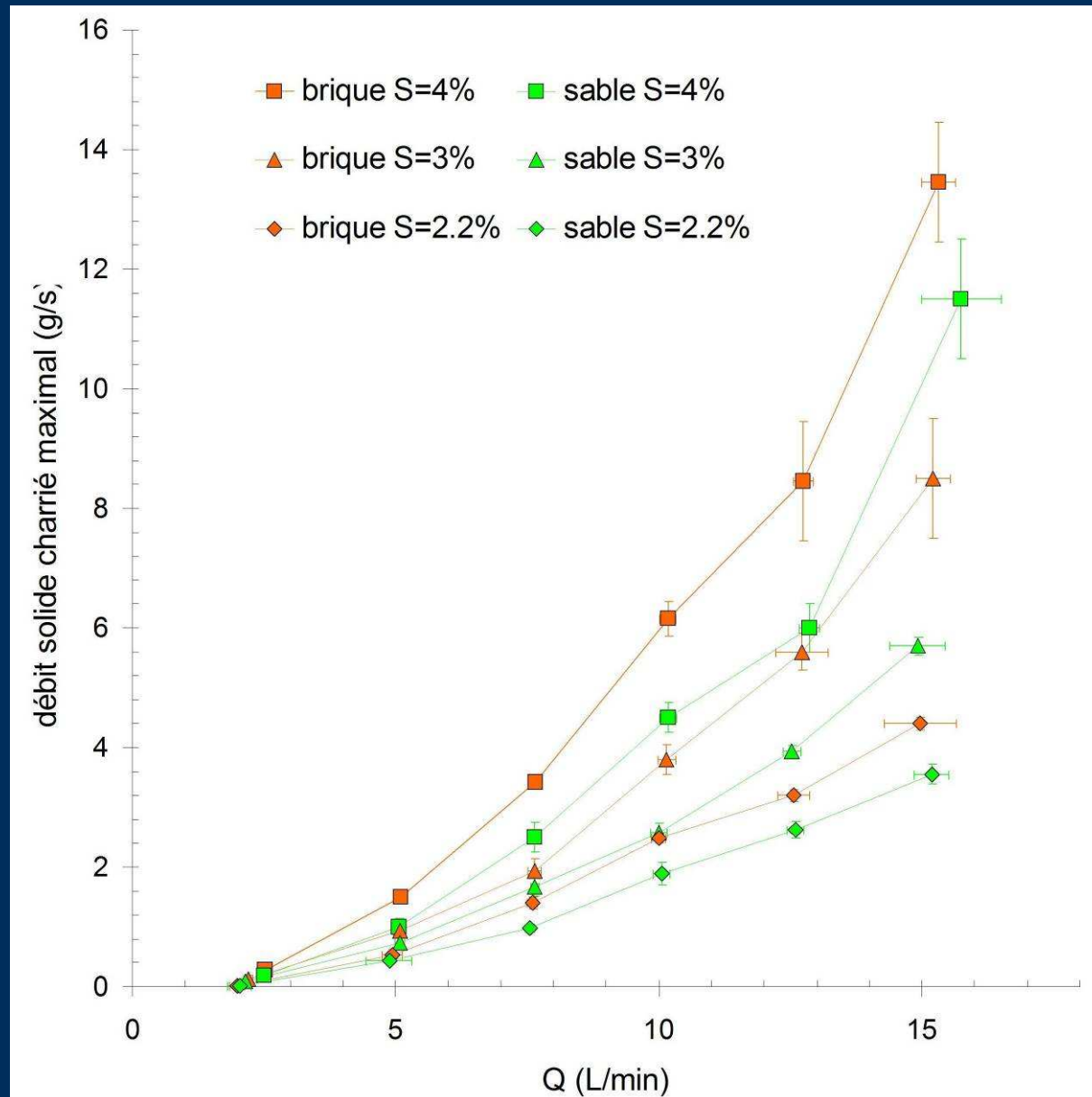
Hydraulique

Effet densité matériau + hydraulique

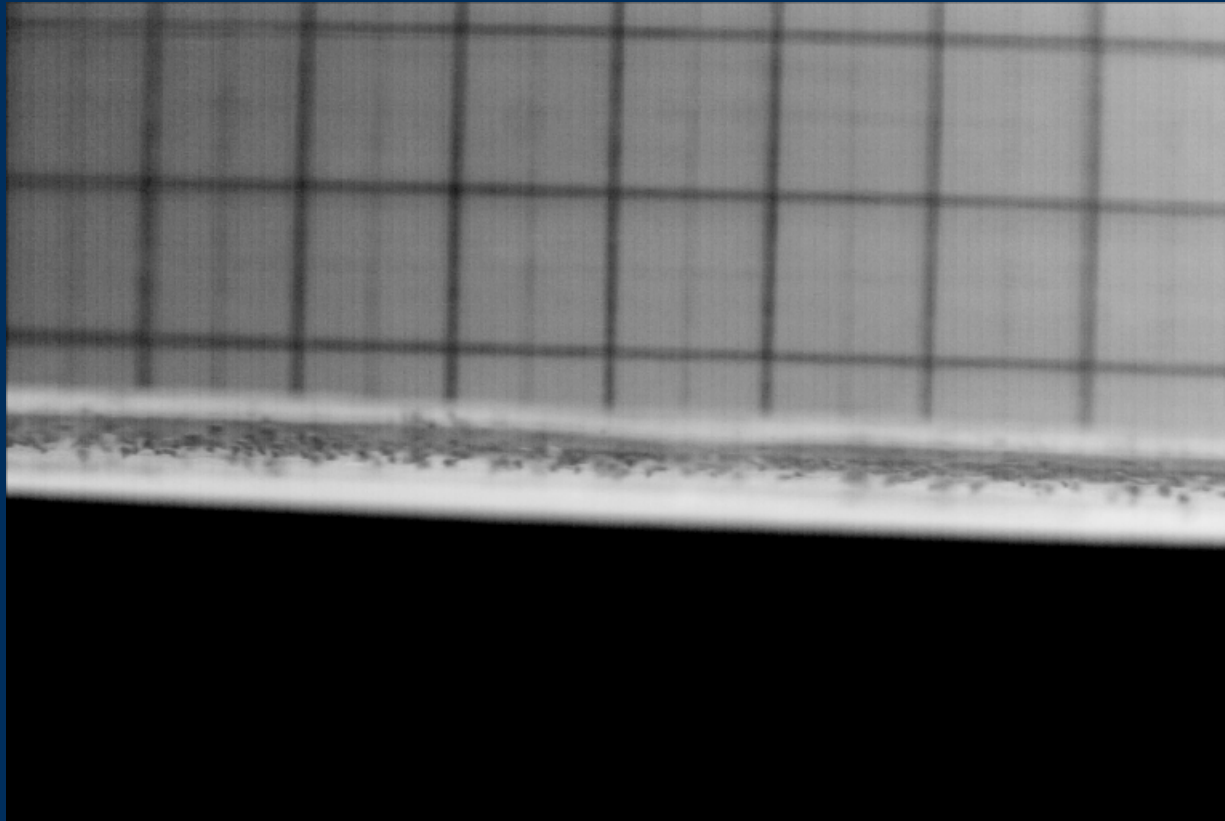
Effet suspension + hydraulique

Résultats : effet densité matériau

	Brique 400-600 μm	Sable 400-600 μm
ρ_s (kg m^{-3})	2425	2635
V_s (cm s^{-1})	3.6	5.2



Observations



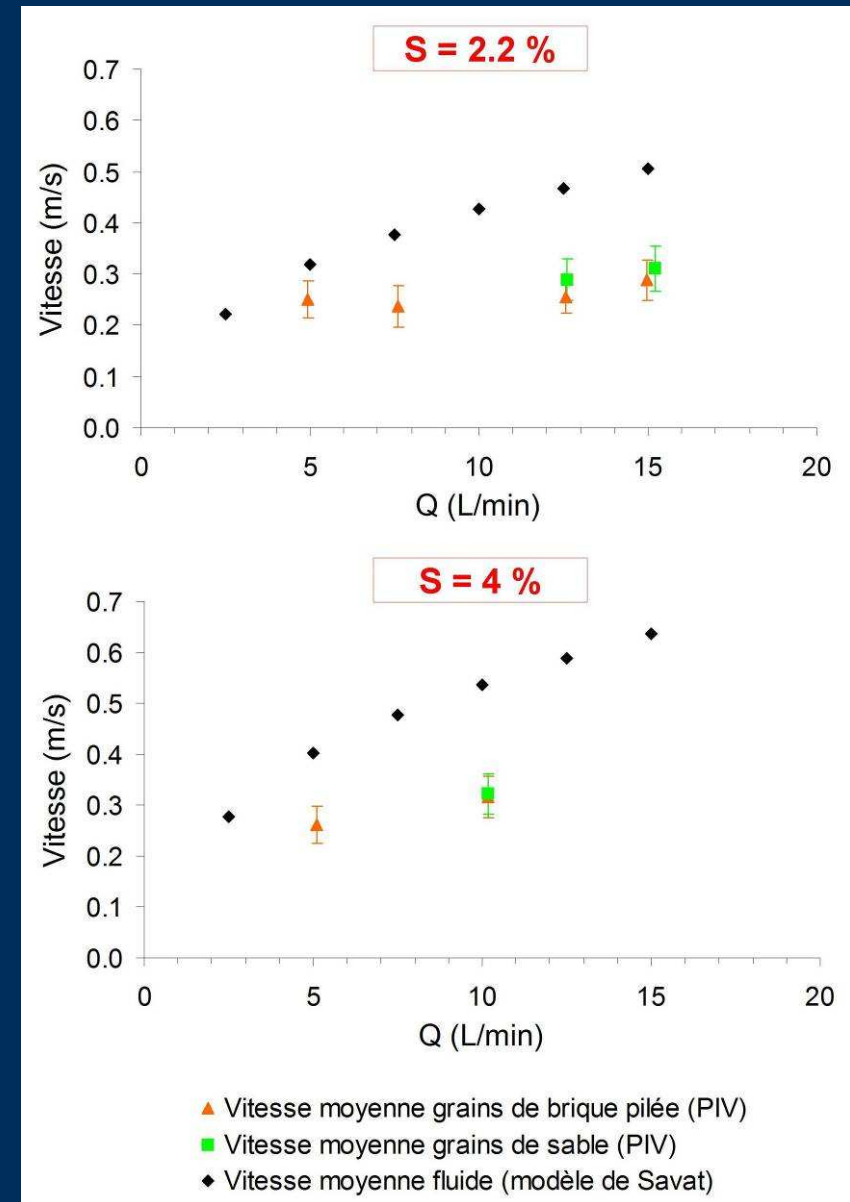
Transport par saltation, roulement

Résultats PIV (Particle Image Velocimetry)

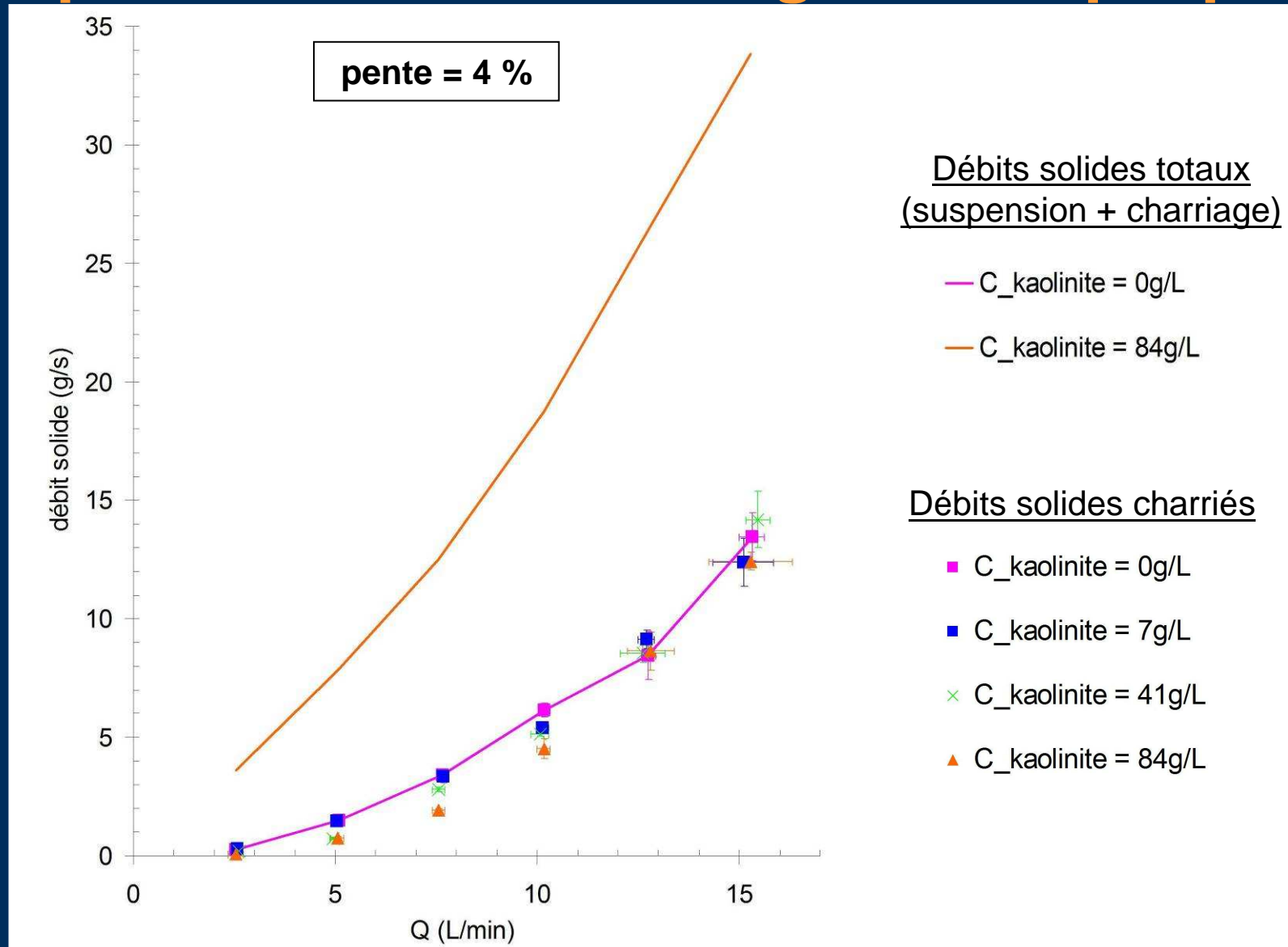
Calculs des vitesses :
Hauet et al. (2005)



$$0.5 < \frac{V_{\text{grains charriés}}}{V_{\text{moyenne de l'écoulement}}} < 0.8$$



Résultats : effet du transport de matière en suspension sur le charriage de brique pilée



Bilan

- L'effet de la densité est important
- L'apport de matière en suspension n'affecte pas significativement le transport par charriage dans les conditions expérimentales que nous avons testées
- L'intérêt d'adopter une modélisation basée sur les modes de transport plutôt que par classe de particules

**Comment utiliser ce modèle pour réfléchir
au changement d'échelle de la parcelle au
petit bassin versant ?**

→ Une expérimentation numérique

La démarche

PLUIE

CLIMAT TEMPERE

- Orage
- Front océanique

CLIMAT MEDITERRANEEN

- Orage
- Orage inversé

RUISSELLEMENT DE L'AMONT

$$Q_{in} = 0 \text{ L/m/min}$$

$$Q_{in} = 16 \text{ L/m/min}$$

SOLS

Clay Loam

Sand

Silty Clay Loam

Silt Loam

TOPOGRAPHIE

MICRORELIEF

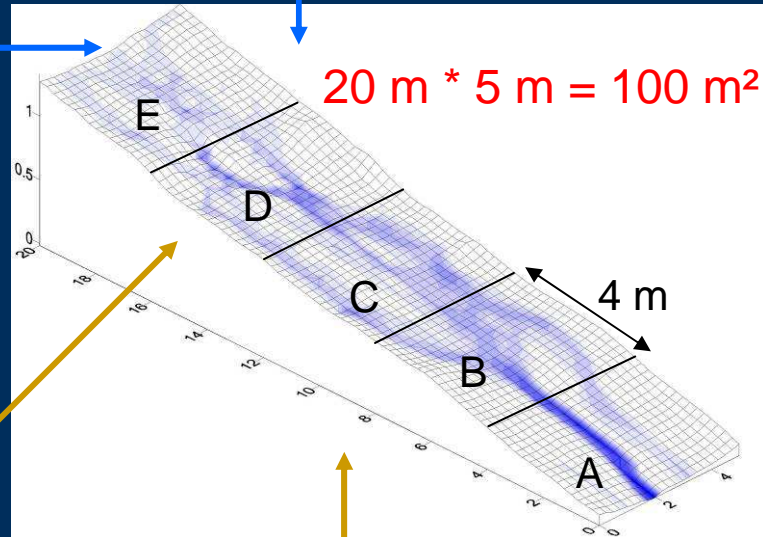
- Pente uniforme : 2 % ; 6 % ; 10 %

- Rupture de pente : 10 % - 2 %

PLAN

- Pente uniforme : 6 %

- Rupture de pente : 10 % - 2 %



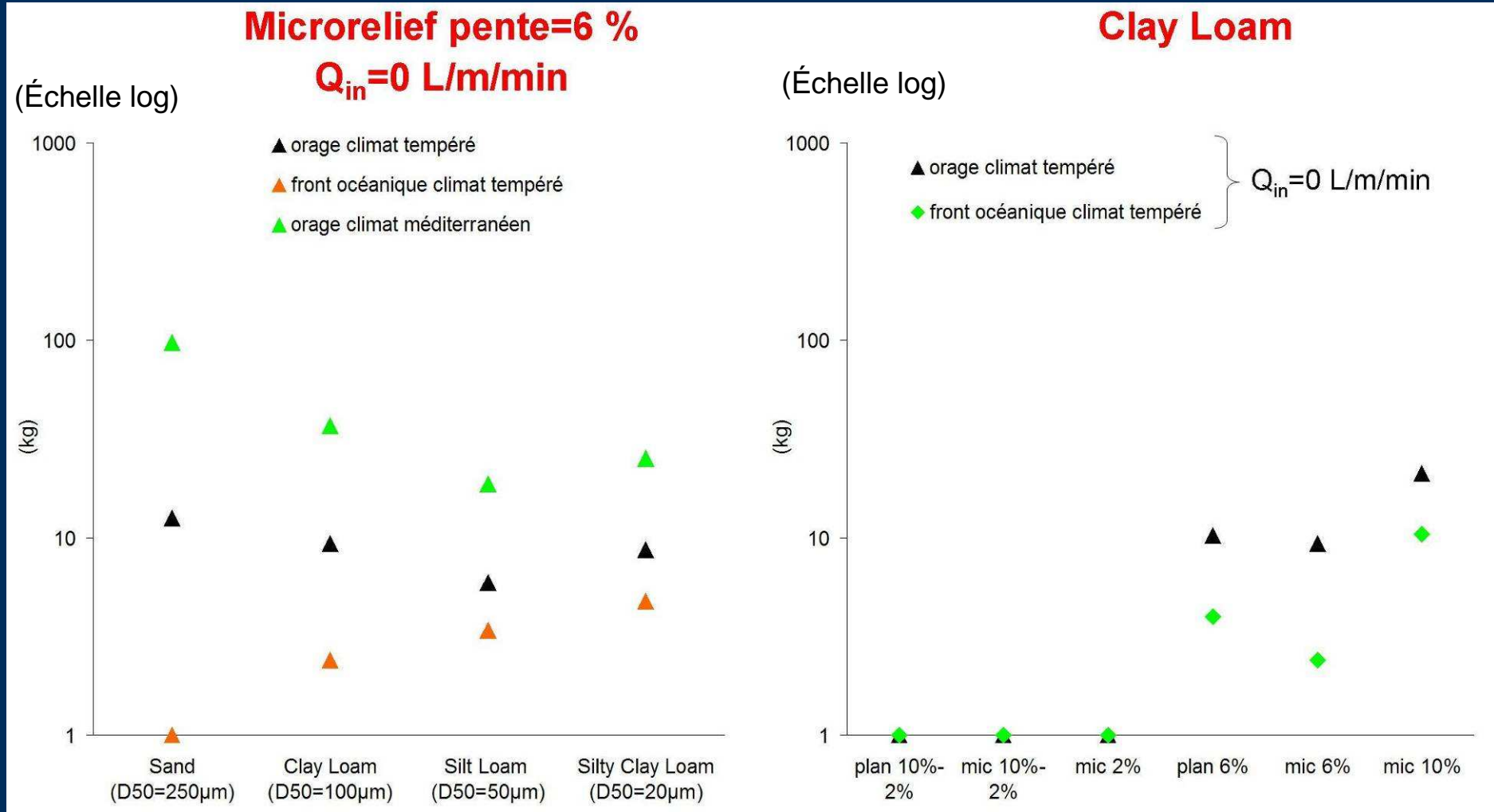
192 simulations

RESULTATS

→ Pour l'ensemble de la parcelle de 100 m²

→ Par bandes de 20 m²

Pertes en sol cumulées à la sortie de la surface de 100 m² (en kg)



Distribution de l'érosion et du dépôt

Référence :

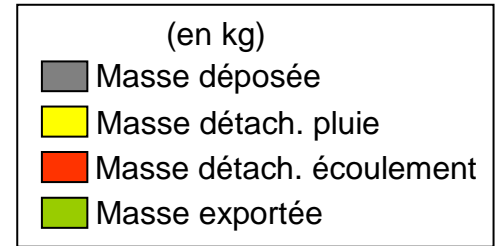
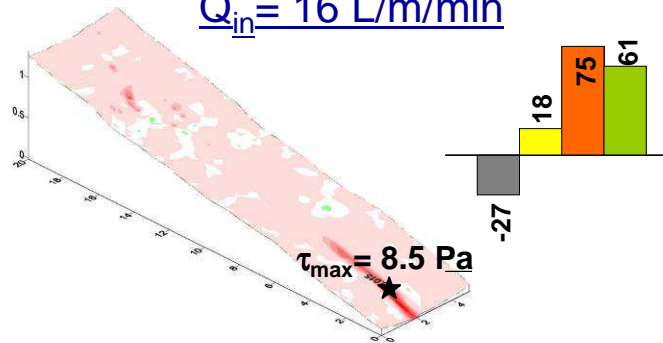
Clay Loam ($\tau_{sol} = 2.5 \text{ Pa}$)

Microrelief, $S = 6\%$

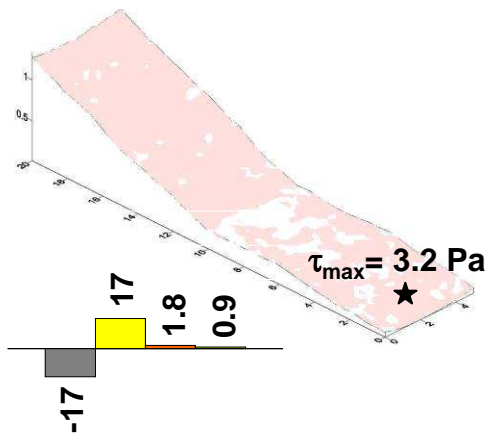
Orage (climat tempéré)

$Q_{in} = 0 \text{ L/m/min}$

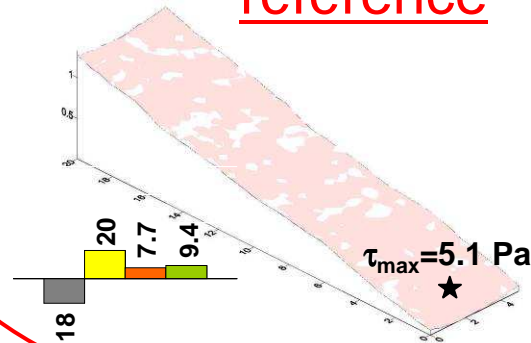
$Q_{in} = 16 \text{ L/m/min}$



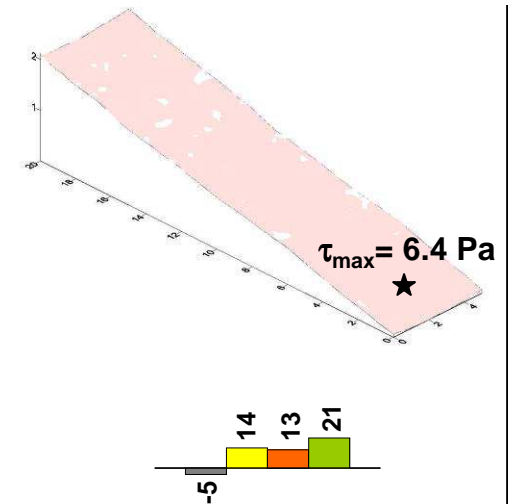
Microrelief, $S = 10 - 2 \%$



référence

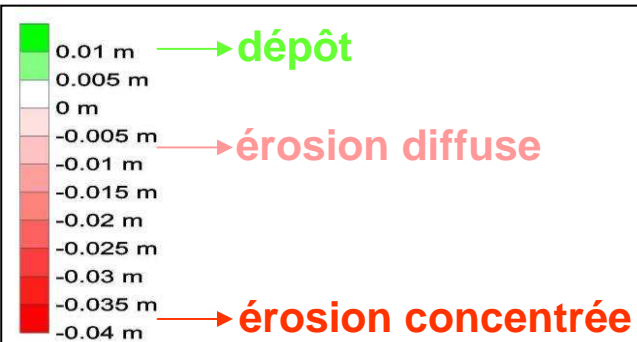
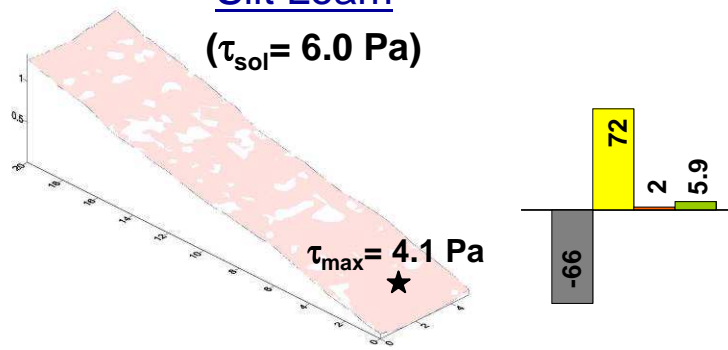


Microrelief, $S = 10 \%$



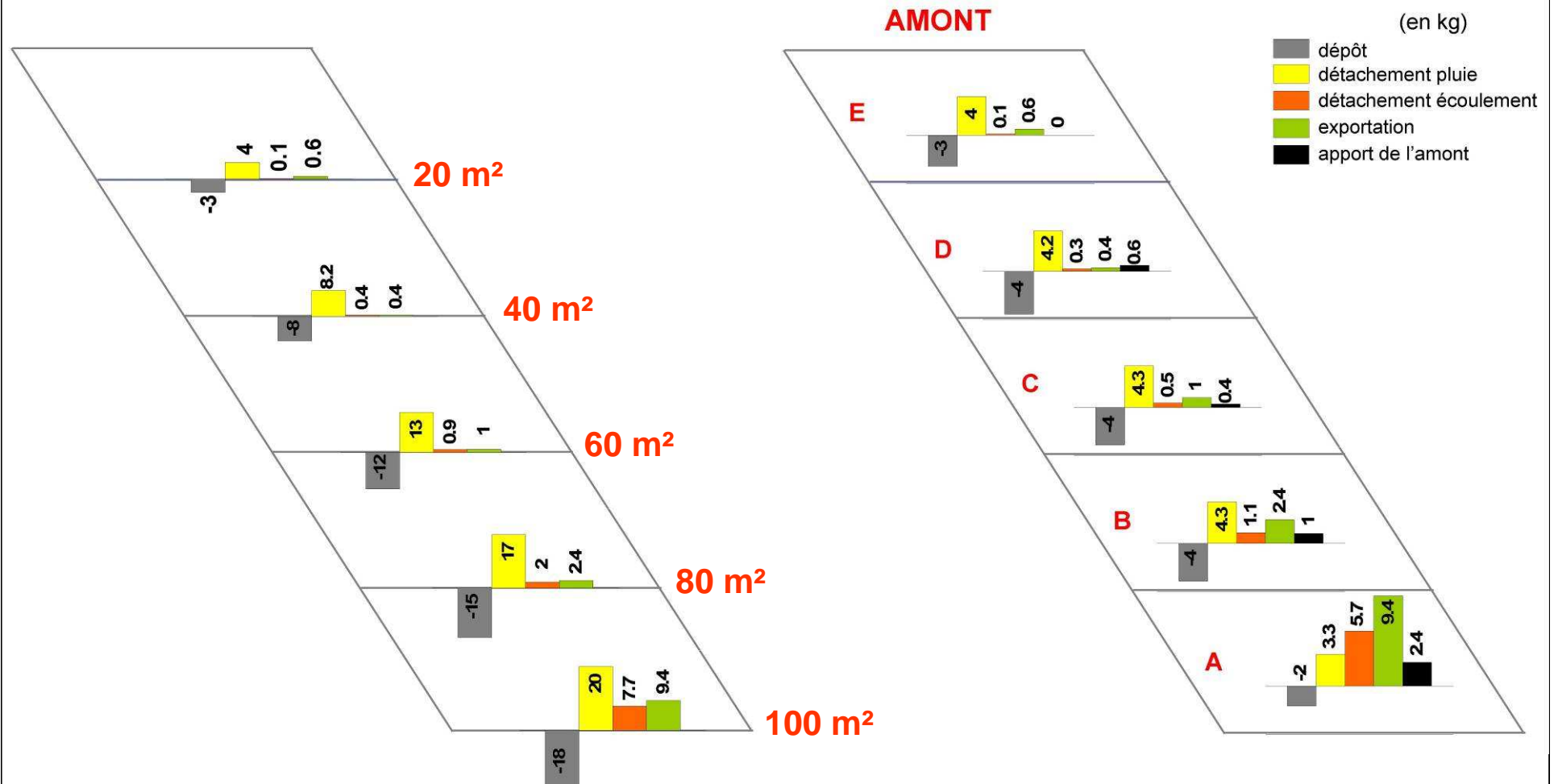
Silt Loam

($\tau_{sol} = 6.0 \text{ Pa}$)



Bilans d'érosion par bandes 20 m²

Simulation de référence



Bilan

(échelle de temps = évènement pluvieux)

- Facteurs pour lesquels les pertes en sol sont sensibles :
pente, résistance du sol à l'écoulement, intensité du ruissellement
- Sources d'érosion dominantes :

$Q_{in} = 0$ L/m/min :

- **action de la pluie** sur une grande partie
amont de la parcelle
→ EROSION DIFFUSE (sélectivité)
- **arrachement par l'écoulement** à l'aval
de la parcelle quand ce processus est actif
→ EROSION CONCENTREE (peu de
sélectivité)

$Q_{in} = 16$ L/m/min :

- **arrachement par l'écoulement** à
l'amont et à l'aval de la parcelle
→ EROSION CONCENTREE (pertes
en sol décuplées + peu de sélectivité)
!! Pente forte + Q_{in} !!

Conclusions

- **PSEM_2D** : un outil approprié pour étudier les transferts d'eau et de particules sur les versants
- **La nature des particules érodées** : un enjeu pour la modélisation du transfert de matière depuis les versants jusqu'au réseau de drainage
- **La modélisation de l'érosion concentrée couplée avec les équations de Saint Venant** : permet de tester les concepts introduits dans la représentation des processus d'érosion
- **La suspension et le charriage** : deux modes de transport distincts, fonction de la nature des particules et des propriétés hydrauliques de l'écoulement, à prendre en compte dans la modélisation
- **Les simulations dans des conditions variées avec PSEM_2D** : permettent de mettre en évidence les comportements de l'érosion hydrique sur les versants (il reste encore beaucoup à faire pour l'étude du changement d'échelle mais des outils ont été mis en œuvre pour y parvenir)
- **Les données observées distribuées pour évaluer le modèle** : peu nombreuses

Perspectives

EXPERIENCE:

- Compléter les **expériences dans le canal** (densité plus faible : anthracite ; d'autres tailles de particules)
- Obtenir des **jeux de données distribuées** complets (hydraulique, érosion, granulométrie...) pour évaluer le modèle
- Mener des expériences de laboratoire permettant de **mesurer hydrauliquement la contrainte de cisaillement critique due à la cohésion**

MODELISATION:

- Implémenter un **2ème mode de transport** dans PSEM_2D : le charriage
- Améliorer la représentation de **l'hydraulique** (pertes de charges singulières)
- Trouver une modélisation capable de gérer les cas où le creusement est important (**modèle 3D ou modèle plus simple mais qui intègre les processus d'érosion gravitaires**)
- Mettre en évidence des lois de comportements qui serviront à la **paramétrisation** des processus de l'érosion hydrique en **sous-maille des modèles de BV**

**Merci de votre
attention**