

# L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS, UN PROBLÈME AGRONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL

Claude Bernard Ph.D.  
IRDA, chercheur associé

MAPAQ, sous-ministériat à la transformation  
et aux politiques bioalimentaires  
14 juin 2018



# PLAN DE LA PRÉSENTATION

1. Introduction
2. Facteurs aggravant l'érosion
3. Mesure de l'érosion
4. Impacts de l'érosion
5. Conclusion



# INTRODUCTION

# ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS

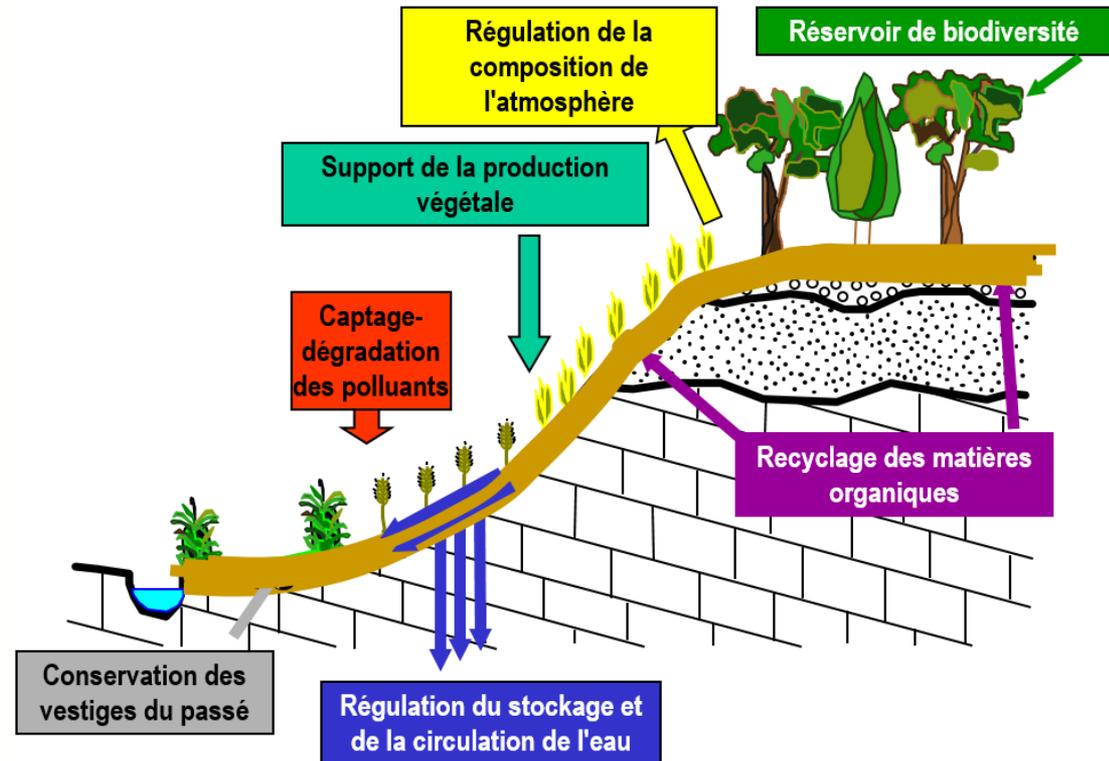
Un processus naturel à l'échelle géologique ...



... qu'un usage inapproprié du territoire peut accélérer

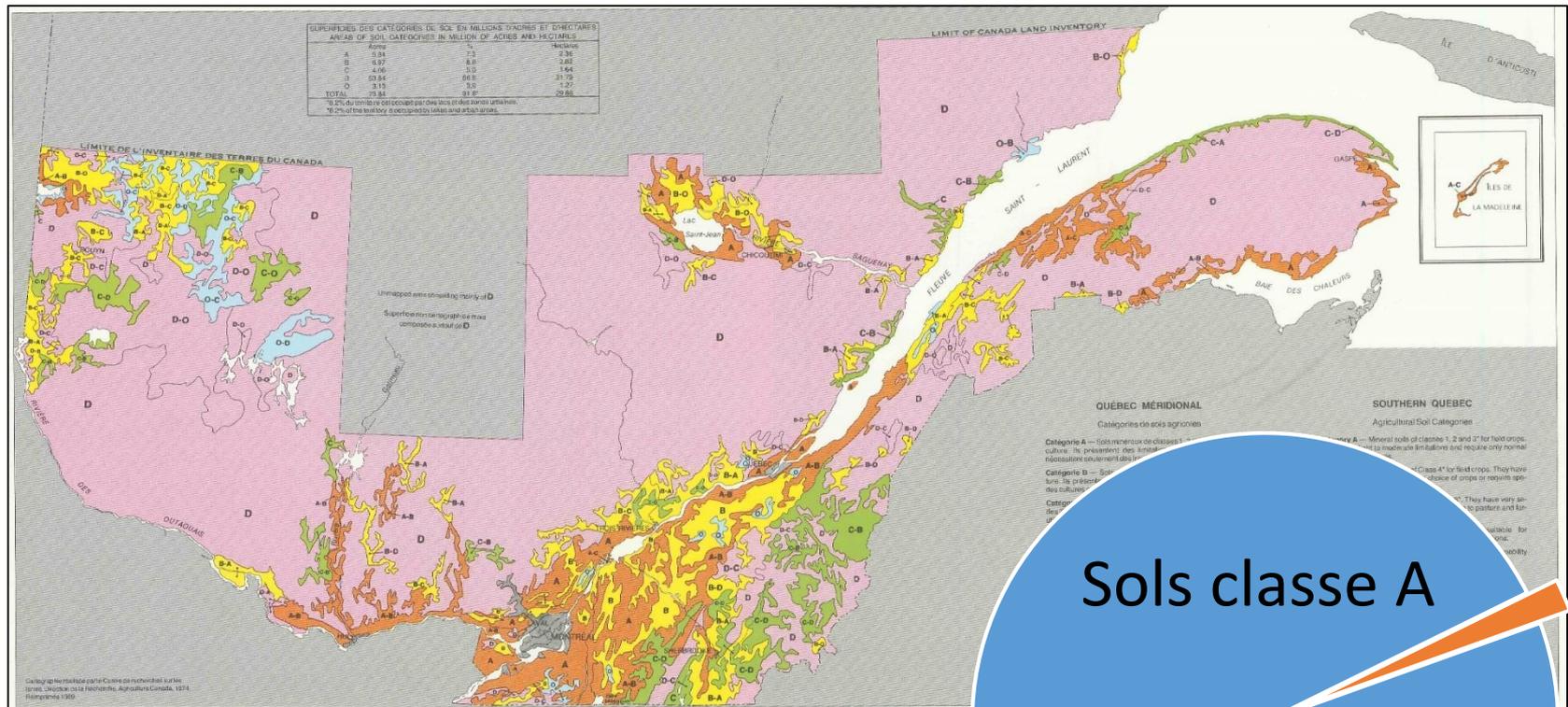
# RÔLES DES SOLS

- Milieu de croissance des plantes
- Régularisation du cycle des nutriments
- Régularisation du cycle du carbone
- Régularisation du cycle de l'eau
- Siège de la biodiversité
- Filtre environnemental, dégradation, rétention de polluants



Daily et al., 1997; Singer and Ewing, 2000

# RARETÉ DES BONS SOLS



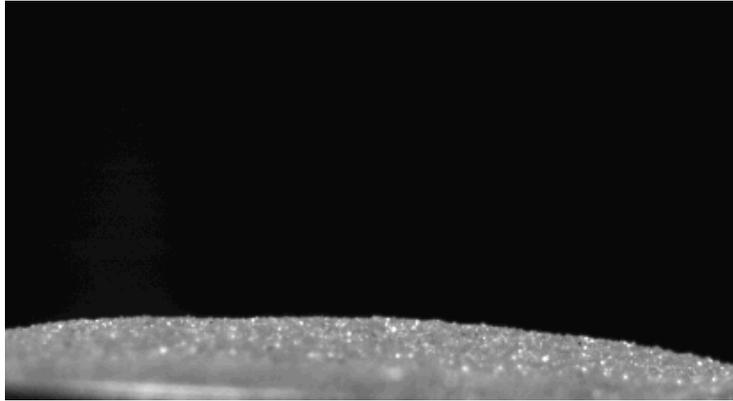
Lajoie, 1975

Sols classe A

2,36 Mha  
(1,8 %)

# FACTEURS AGGRAVANT

# ÉROSIVITÉ DES PRÉCIPITATIONS



$$R = E * I_{30}$$

R = érosivité (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)

E = énergie cinétique ( $\frac{1}{2} m v^2$ )  
(MJ ha<sup>-1</sup>)

I<sub>30</sub> = intensité max. 30-min  
(mm h<sup>-1</sup>)

Hauteur (mm)	Durée (h)	Int. moy. (mm h <sup>-1</sup> )	Int. 5 min. (mm h <sup>-1</sup> )	Érosion (t ha <sup>-1</sup> )
18,6	0,3	62	70	24,2
15,9	2,0	8	43	11,6
17,8	8,0	2	21	4,2

Dubé, 1968

Érosion nivale:

- 20-30% des précipitations
- 10-90% de l'érosion annuelle

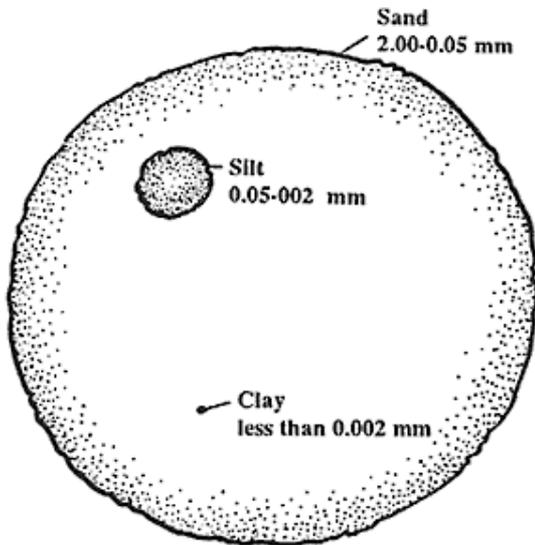
Dubé, 1975;

Kirby et Mehuys, 1987

# ÉRODABILITÉ DES SOLS

$K = t \text{ ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  (t/ha par unité de R)

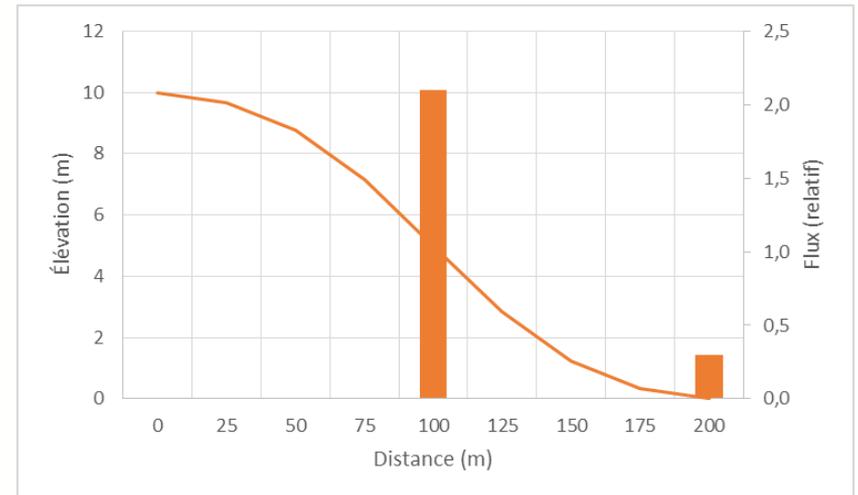
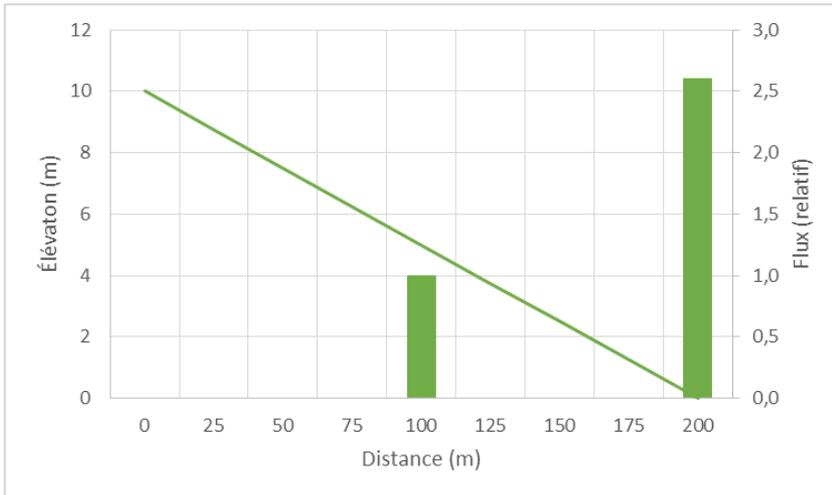
~ [ Texture ] [ Matière organique ] [ Structure ]  
[ Perméabilité ]



	Arrachement	Transport
Argile	—	+
Limon	+	+
Sable	+	—

# TOPOGRAPHIE

$$LS \sim [ \text{Longueur}^{0,5} ] [ \text{Inclinaison}^2 ]$$



d'après Moore et Burch, 1986

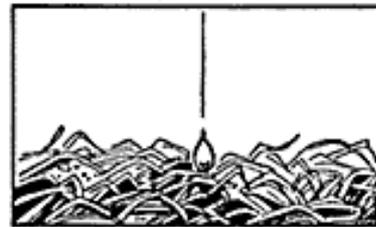
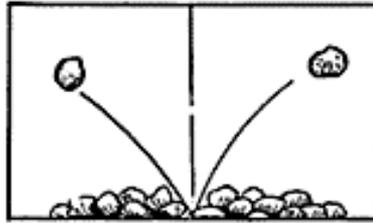
# CULTURES

La vulnérabilité des cultures annuelles (maïs, horticulture) est plusieurs fois supérieure à celle des herbages

Traitement	Perte de sol (kg/ha)
<i>Saint-Coeur-de-Marie, loam Taillon, pente 18%</i>	
Prairie permanente	3
Foin cultivé	9
Céréales	500
Sol nu	34000
<i>Cap-aux-Corbeaux, l. s.-gr. Charlevoix, pente 15%</i>	
Prairie permanente	60
Foin cultivé	560
Céréales	3800
Pomme de terre	6000
Sol nu	28100
<i>Lennoxville, loam argileux Coaticook, pente 10%</i>	
Prairie permanente	190
Maïs	12700
Sol nu	31100

données compilées par Mehuys et al., 1981

# PRATIQUES CULTURALES



Le travail réduit du sol met à profit l'effet protecteur des résidus de culture qui:

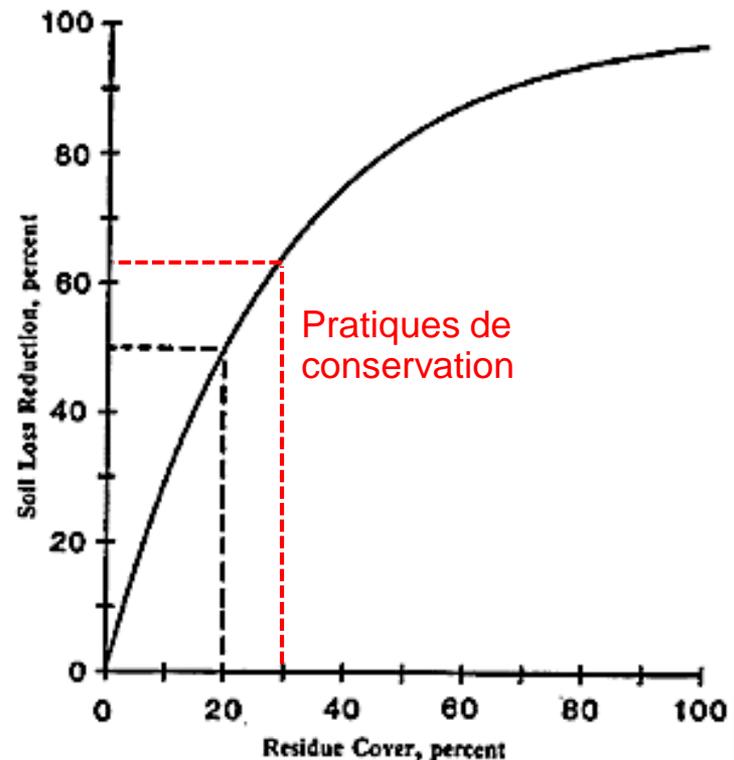
- absorbent l'énergie cinétique des pluies
- ralentissent le ruissellement
- accroissent l'infiltration

# PRATIQUES CULTURALES

Type de labour

Quantité de résidus  
laissés en surface

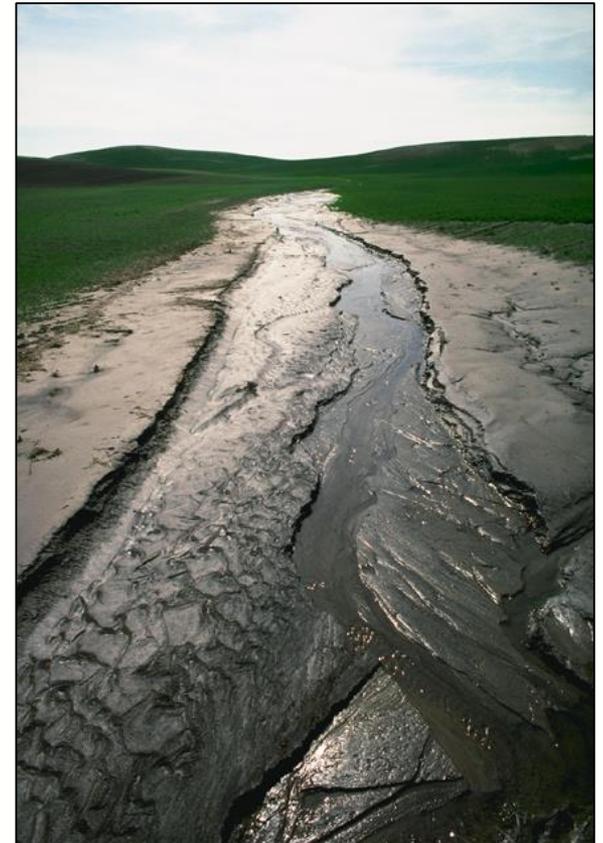
Labour	Effet
Automne	1,00
Printemps	0,90
Sous paillis	0,60
Sur billon	0,35
Zéro	0,25



# MESURE DE L'ÉROSION

# POURQUOI MESURER ?

- Données fiables sur les taux d'érosion et de sédimentation sous diverses conditions agroenvironnementales (climat, sol, pente, cultures...)
- Patrons et bilans de redistribution du sol dans les champs et les bassins versants
- Évaluation des impacts agronomiques et environnementaux
- Évaluation de l'efficacité de différentes approches de contrôle



# TECHNIQUES DE MESURE

1. Modélisation et méthodes de prédiction

2. Techniques de mesure directe et indirecte
- relevés de terrain
  - parcelles d'érosion
  - mesure des charges sédimentaires
  - techniques isotopiques



# MODÉLISATION

- Plusieurs modèles disponibles
- Complexité variable
- Choix selon les objectifs de la modélisation
- Complexité et disponibilité des inputs à considérer
- Nécessité de valider par des mesures réelles

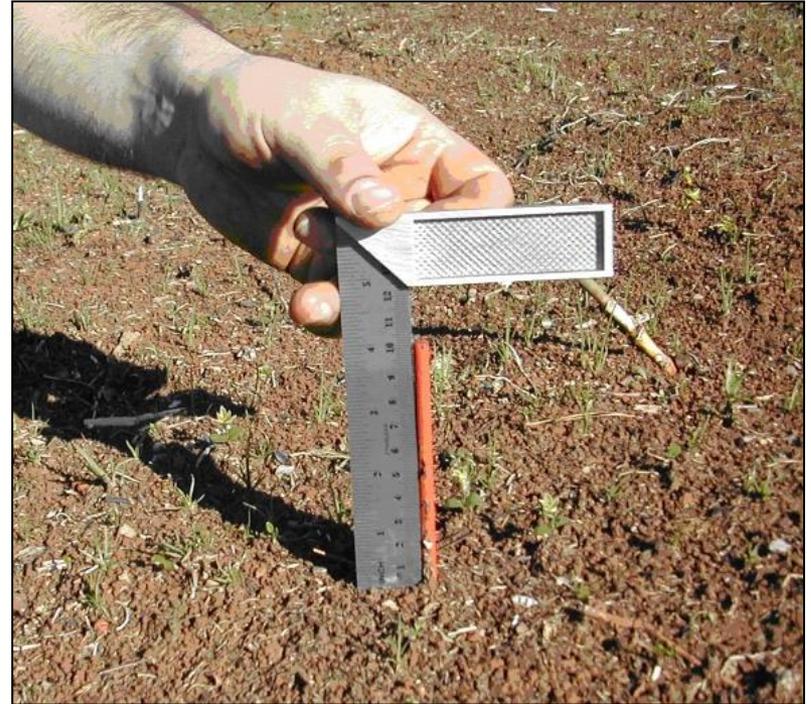
## Soil erosion models

### Water erosion

- AGNPS (Agricultural Non-Point Source pollution model)
  - AGNPS-UM (Agricultural Non-Point Source pollution model, modified)
- ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation)
- CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)
- EGEM (Ephemeral Gully Erosion Model)
- EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator)
- EROSION-3D
- EUROSEM (European Soil Erosion Model)
- GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)
- KINEROS2
- LISEM (Limburg Soil Erosion Model)
- MEDRUSH (0.5 MB PDF)
- MOSES (Modular Soil Erosion System) project
- MWISED (Modelling Within-Storm Sediment Dynamics) project ([link down](#))
- RillGrow 1 and 2
- RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) 1 and 2, USDA-ARS site
  - RUSLE 2, NRCS site
  - RUSLE on-line
  - RUSLE for mined lands
  - RUSLE 2
- SWAT (Soil and Water Assessment Tool)
- USLE (Universal Soil Loss Equation)
  - APSIM (Agricultural Production Simulator): uses modified MUSLE
  - TMDL (Total Maximum Daily Load) USLE
  - USLE-2D (Universal Soil Loss Equation 2D)
  - USLE (MS Excel™ version)
  - USLE-M (Universal Soil Loss Equation Modification)
  - USPED (Unit Stream Power-based Erosion Deposition)
- WATEM (Water and Tillage Erosion Model)
- WEPP (Water Erosion Prediction Project)
  - GeoWEPP (Geo-spatial interface for WEPP)
  - WEPP interfaces (US Forest Service)

# RELEVÉS TERRAIN-TIGES

- Mesure la perte ou l'accumulation de sol autour de la tige
- Rangs de tiges en travers de la pente
- Valeurs ponctuelles
- Précision  $\pm 1$  mm soit  $\sim 12$  t ha<sup>-1</sup>



# PARCELLES-PLUIES NATURELLES

- Résultats précis
- Érodabilité du sol, vulnérabilité des systèmes de production, efficacité de pratiques de conservation
- Valeurs saisonnières et annuelles
- 5 années de mesures au minimum
- Longueur 9 - 10 m minimum
- Nombre de parcelles pour étudier diverses combinaisons sol-pente-culture-pratiques



# PARCELLES-PLUIES SIMULÉES

- Reproduction des pluies naturelles avec une intensité et une énergie cinétique connues
- Contrôle des conditions expérimentales
- Analyse rapide de divers systèmes
- Limitation de la longueur de pente



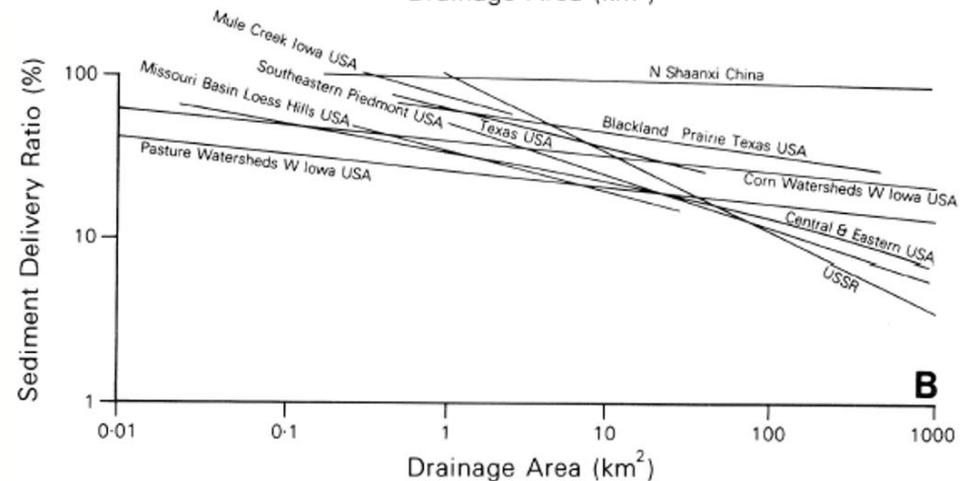
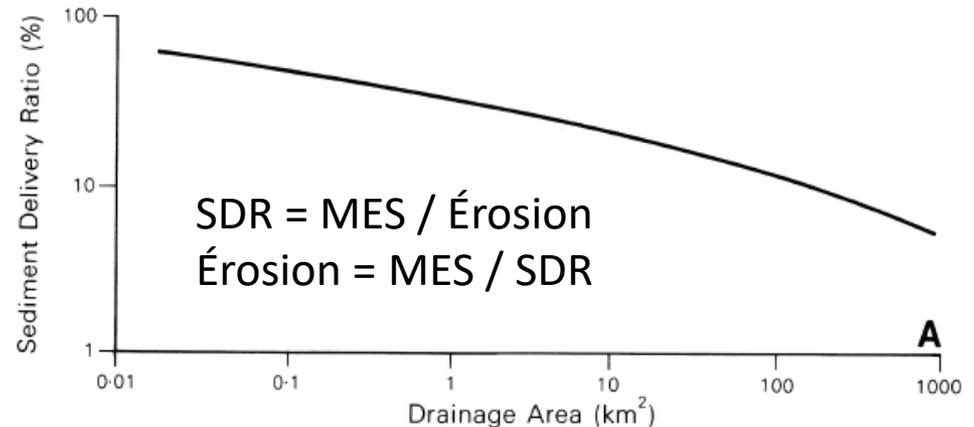
# MESURE CHARGES SÉDIMENTS

## Validité des mesures

- localisation des stations d'échantillonnage
- stratégie d'échantillonnage
- efficacité des équipements
- mesures pluri-annuelles

## Liens charges-érosion

- SDR ~ taille et forme du BV, pentes, sols, cultures, etc.
- délai entre pluies et charges en BV
- origine spatiale des sédiments inconnue



Walling, 1994

# RETOMBÉES ISOTOPIQUES

(1) Retombées avec les précipitations (P)  
Fixation rapide par le sol  
Mesure à partir d'un site de référence (R)

(2) Ruissellement, transport des sédiments et des retombées

3) Site érodé;  $P < R$   
Site déposition;  $P > R$

Niveau résultant du sol

Niveau original du sol

(4) Modèle de conversion: transforme les retombées  
( $\text{Bq m}^{-2}$ ) en mouvements de sol ( $\text{t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ )

# COMPLÉMENTARITÉ

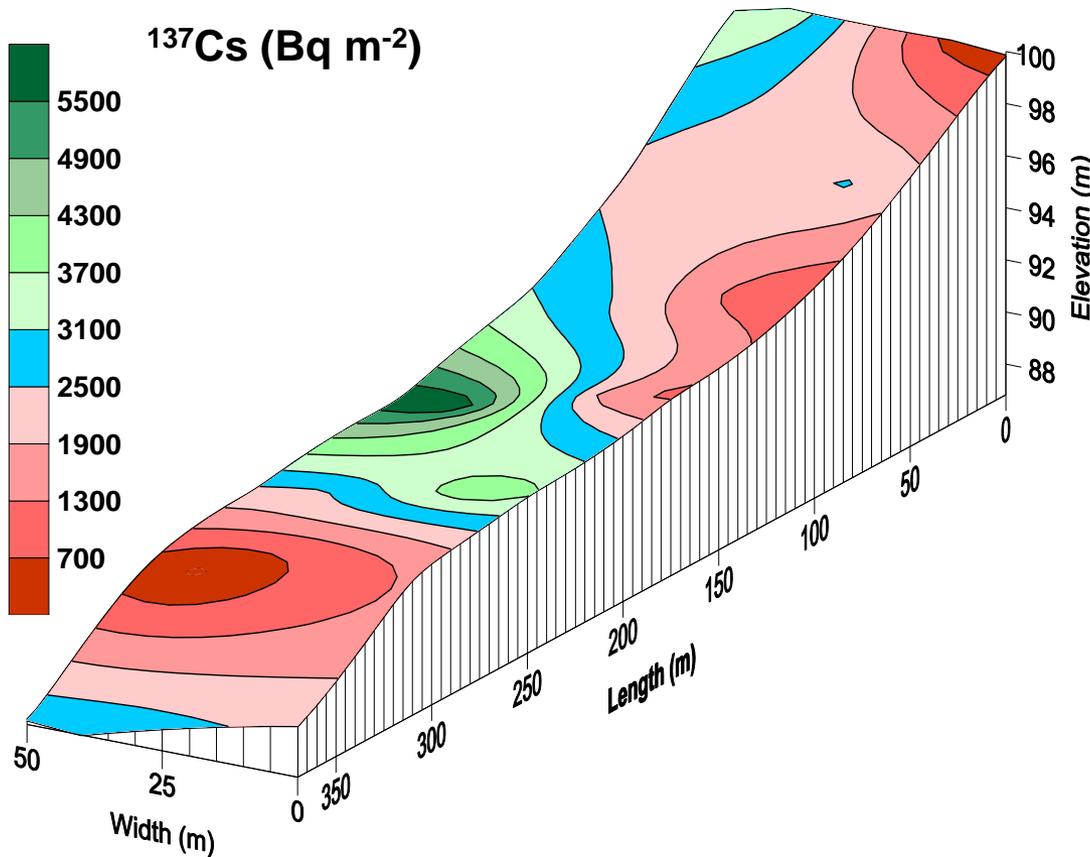
## Conventionnelles

- exigeantes en ressources (main d'œuvre, temps, \$)
- entretien régulier requis
- limitations liées aux échelles temporelle et spatiale
- valeurs à court-moyen terme
- redistribution spatiale non documentée

## Radioisotopes

- un seul échantillonnage
- équipements spécialisés
- échelle spatiale de la parcelle au bassin versant
- échelle temporelle
  - $^7\text{Be}$ : événement pluvieux
  - $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239-240}\text{Pu}$ : 60 ans
  - $^{210}\text{Pb}$ : 100 ans
- redistribution spatiale révélée et quantifiée

# BILAN PAR CHAMP



■ Stable : 16% superficie

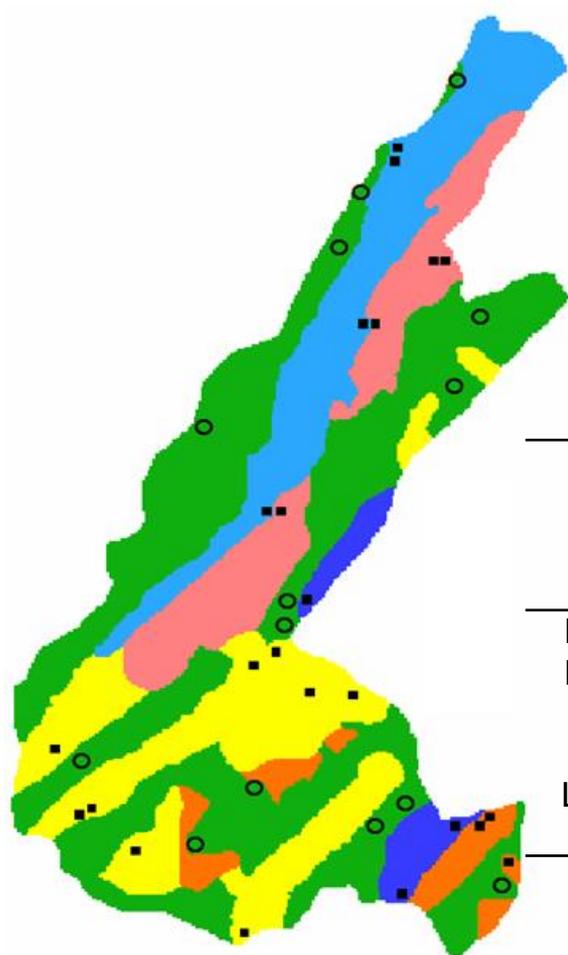
■ Perte :  
67% @ 4.7 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>

■ Déposition :  
17% @ 0.7 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>

Perte nette : 3 t ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>

Bernard et al., 2003

# BILAN PAR BASSIN



- Forêts
- Loam sableux - pente > 2%
- Loam sableux - pente < 2%
- Loam - pente > 2%
- Loam - pente < 2%
- Loam limono-argileux - pente < 2%

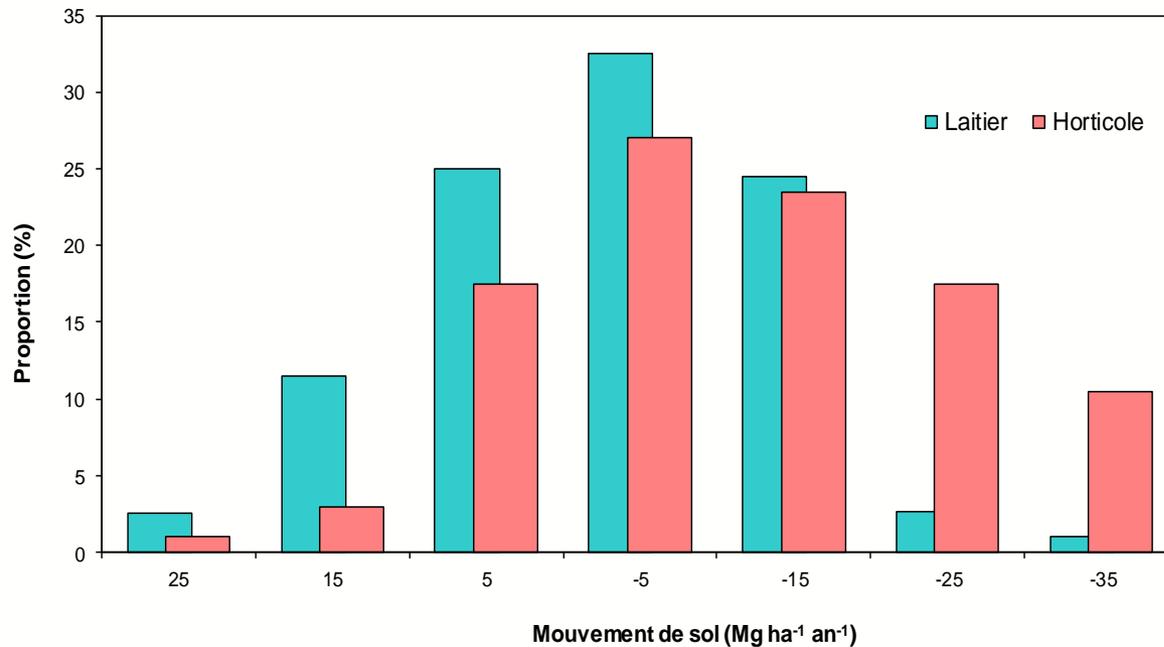
- Champs cultivés
- Sites de référence

Texture sol	Pente	Production MES des champs	Superficie isosecteur	Production MES des isosecteurs	Fraction de la production totale
	(%)	(t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )	(ha)	(t an <sup>-1</sup> )	(%)
Loam sableux	< 2	5,0	4 610	22 245	36,6
Loam sableux	> 2	5,5	1 070	5 489	9,0
Loam	< 2	3,6	700	2 498	4,1
Loam	> 2	6,9	3 310	23 509	38,7
Loam lim.-arg.	< 2	2,7	5 580	7 031	11,6
<b>Total</b>			<b>12 270</b>	<b>60 771</b>	<b>100</b>

Mabit et Bernard, 2008

# INVENTAIRE RÉGIONAL

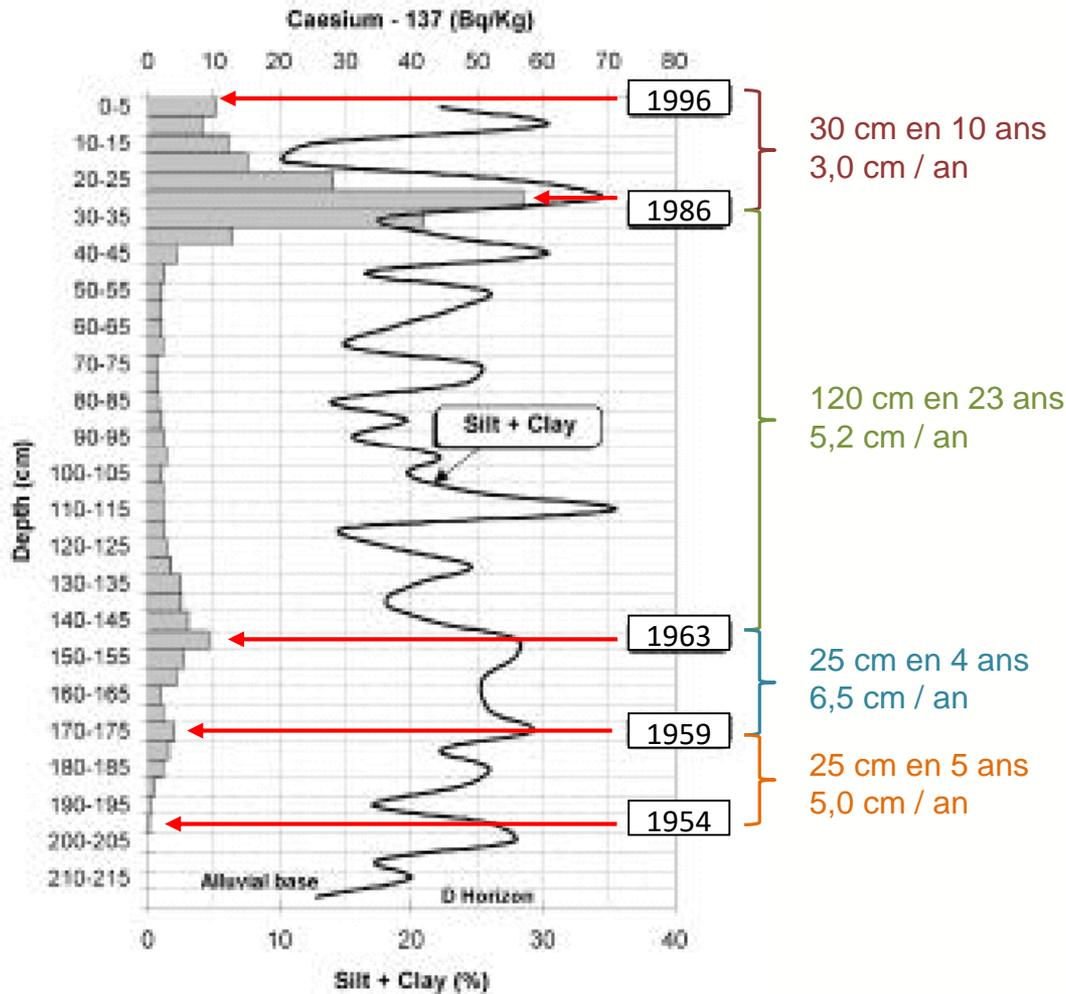
Île d'Orléans  
63 champs; 1200+ points d'échantillonnage



Occupation du sol	Pente (%)	Perte nette (t ha <sup>-1</sup> an <sup>-1</sup> )
Laitier		2,8
Horticole		11,6
	0-2	3,6
	2-5	6,7
	5-9	7,8

Bernard et Laverdière, 1992

# DATATION DES SÉDIMENTS



30 cm en 10 ans  
3,0 cm / an

120 cm en 23 ans  
5,2 cm / an

25 cm en 4 ans  
6,5 cm / an

25 cm en 5 ans  
5,0 cm / an

- 1996 – échantillonnage des sédiments
- 1986 – accident à Chernobyl
- 1963 – maximum des essais atomiques
- 1959 – accélération des essais atomiques
- 1954 – début des retombées de  $^{137}\text{Cs}$

Ionita et Margineanu, 2000

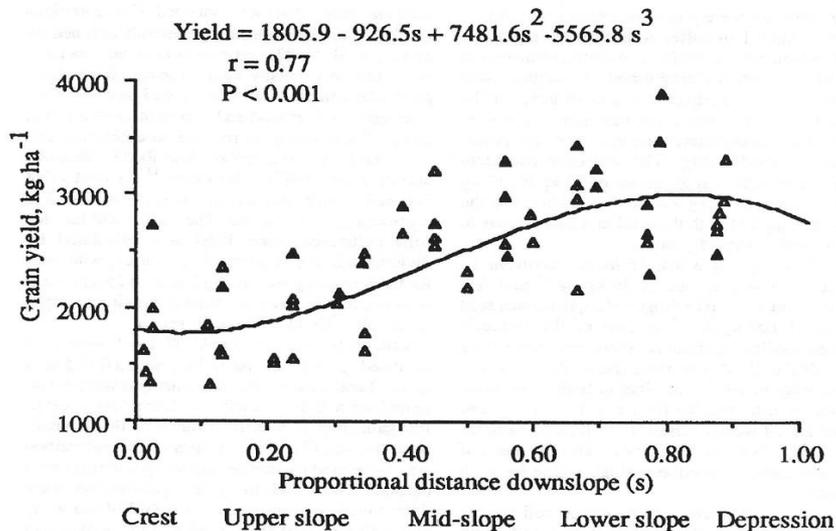
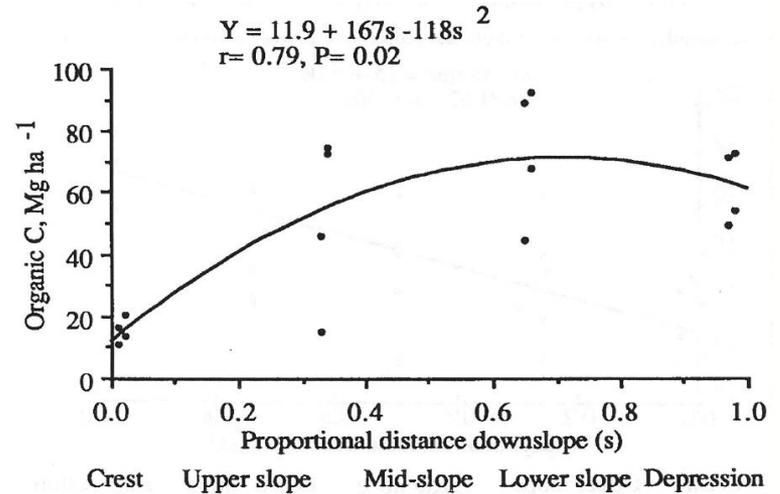
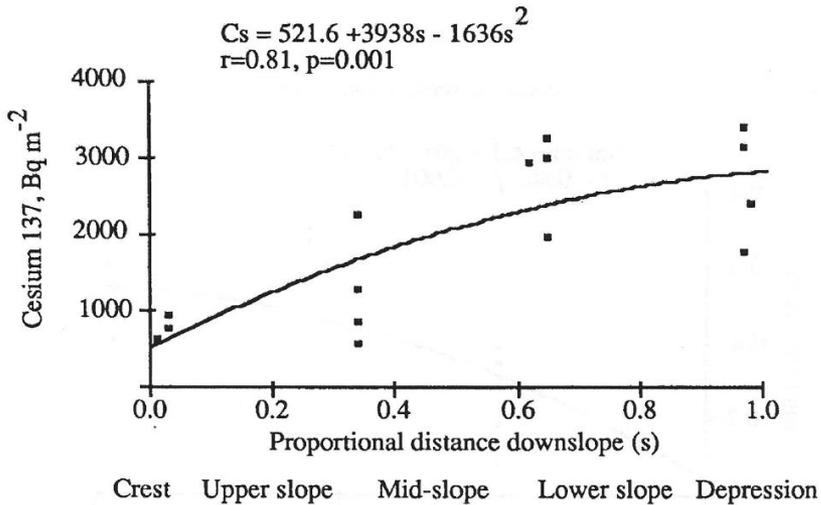
# IMPACTS DE L'ÉROSION

# IMPACTS AGRONOMIQUES



- Amincissement de la zone d'enracinement
- Perte de C, nutriments et pesticides
- Réduction de la capacité de rétention de l'eau
- Travail du sous-sol
  - structure pauvre
  - résistance à la pénétration
- Rendements réduits
- Travaux de nivellement requis
- Valeur foncière réduite

# IMPACTS AGRONOMIQUES



Verity et Anderson, 1990

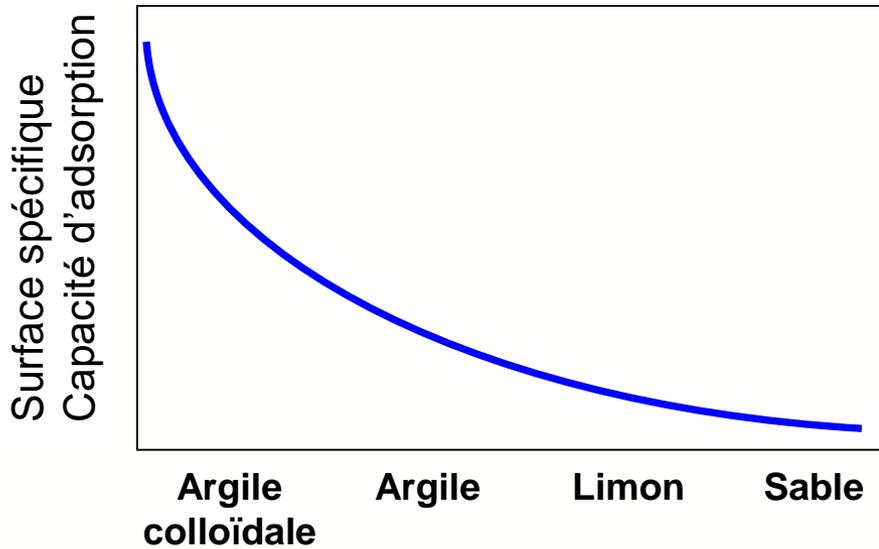
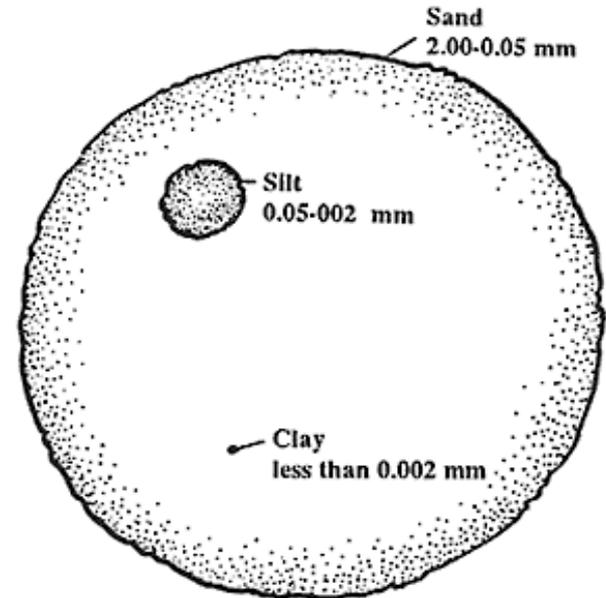
# IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- Turbidité des eaux réceptrices (vie aquatique)
- Sédimentation dans le réseau hydrographique, les réservoirs
- Recreusages plus fréquents, réduction de la vie utile des ouvrages
- Apport de nutriments (P), pesticides et autres polluants (ex: métaux)
- Source majeure de pollution diffuse en milieu rural, en raison des superficies concernées



# EFFET DE LA GRANULOMÉTRIE

	Arrachement	Transport
Argile	—	+
Limon	+	+
Sable	+	—



Fraction	Surface spécifique (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )
Sable	4,4 * 10 <sup>2</sup>
Limon	11,1 * 10 <sup>4</sup>
Argile	7,4 * 10 <sup>6</sup>

# SÉLECTIVITÉ DE L'ÉROSION

## Texture du sol

Propriété	Sol		Sédiments	
	A	B	A	B
Sable (%)	15,7	48,1	5,9 (0,4)	16,9 (0,3)
Argile (%)	20,1	10,9	27,8 (1,4)	19,8 (1,8)
MO (%)	4,9	2,5	5,2 (1,1)	5,2 (2,1)
P (mg/kg)	10,7	6,2	16,8 (1,5)	7,1 (1,2)
K (mg/kg)	134,1	63	155,7 (1,2)	104,5 (1,7)

A: loam limoneux    B: loam graveleux    (xx): ratio sédiments/sol

Bernard et al., 1996

# SÉLECTIVITÉ DE L'ÉROSION

## Sévérité de l'érosion

Pratique	Érosion	Sable	Argile	MO	Nt
	(t/ha)	(%)	(%)	(%)	(mg/kg)
Sol	---	6,8	20	2	1315
Disques	17,2	6,5	20,5	1,8	1300
Chisel	4,6	5,9	47,8	4,1	3300
S. direct	1	3,9	72,3	8,5	8000

Sinukaban, 1981

# COÛTS DE L'ÉROSION

- Coût total à l'échelle d'un pays ou du monde difficile à établir
- Coûts à la ferme (agronomiques) et hors ferme (environnementaux)
- Exemples d'estimations:
  - USA: 27 / 17 G\$ (impacts agro/enviro - Pimentel et al., 1995)
  - USA: 100 M\$ (perte revenus - Crosson, 2007)
  - UK: 420 M£ (coûts externes - Pretty et al., 2000)
  - Monde: 438 M\$ (perte production - den Biggelaar et al., 2004)
  - Monde: 400 G\$ (impacts agro/enviro - Pimentel, 2006)
- Coûts significatifs

# CONCLUSION

# PROBLÈME AGRONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL

Perte de matière  
organique

Dégradation de la  
structure

Compaction

**Érosion**

Pertes sédiments, carbone, nutriments, pesticides

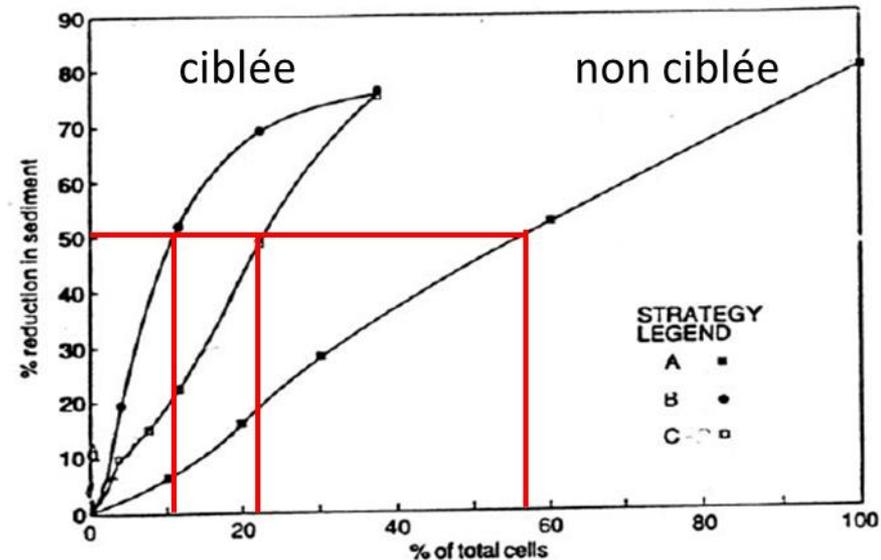
**Productivité du sol**

**Pollution de l'eau**

# CONTEXTE FUTUR

## CIBLER LES INTERVENTIONS

Érosion	Production de MES	
	-	+
-		
+		



Money and technical assistance is **wasted** if not targeted towards prime erosion locations and/or prime sediment sources.

Stream sediment loads are **not likely** to be significantly reduced unless remedial measures are targeted.

Dickinson et al., 2011

# CONTEXTE FUTUR

## CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Impact global: accroissement de l'érosion et de ses impacts agronomiques et environnementaux

Changements		Impacts
↑ température, degrés-jours	↓ matière organique ↓ structure du sol	↑ émissions CO <sub>2</sub> ↑ érodabilité du sol
↑ saison de croissance		↑ intensité des cultures
↑ précipitations extrêmes	↓ infiltration	↑ érosivité pluies ↑ ruissellement direct
↑ population ↑ demande aliments		↑ besoin de sols ↑ pression sur les sols

**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION**

**QUESTIONS ?**