

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

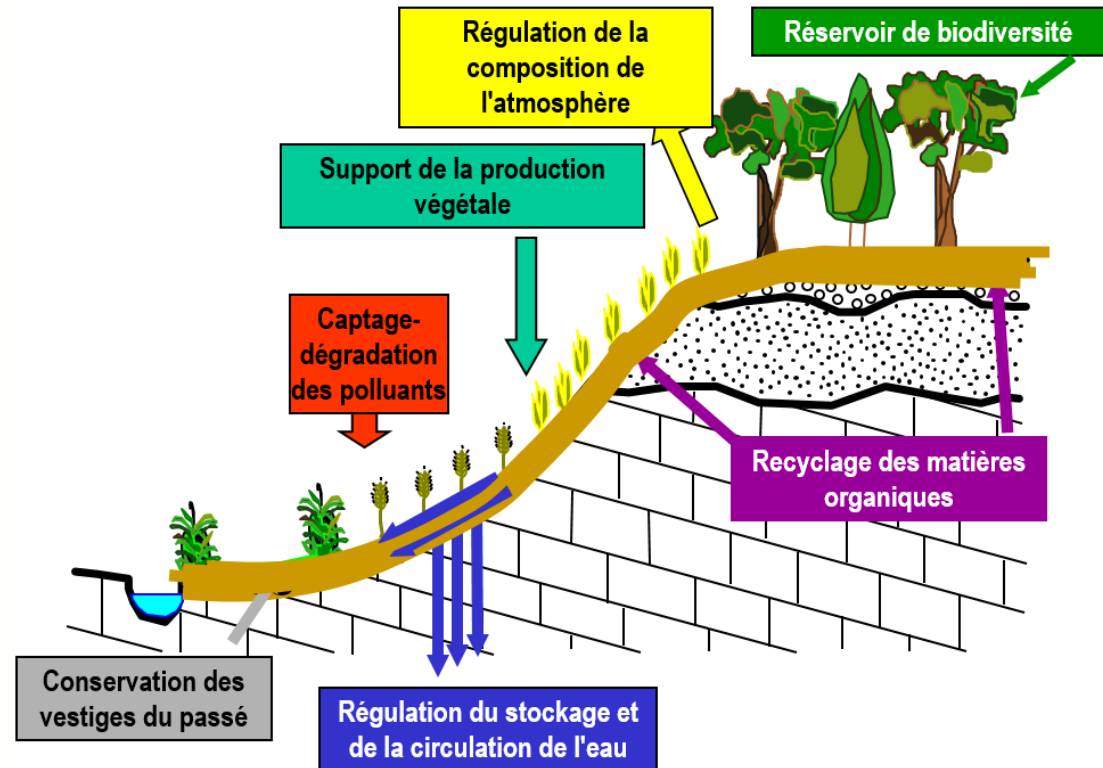
Un processus naturel à l'échelle géologique ...



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

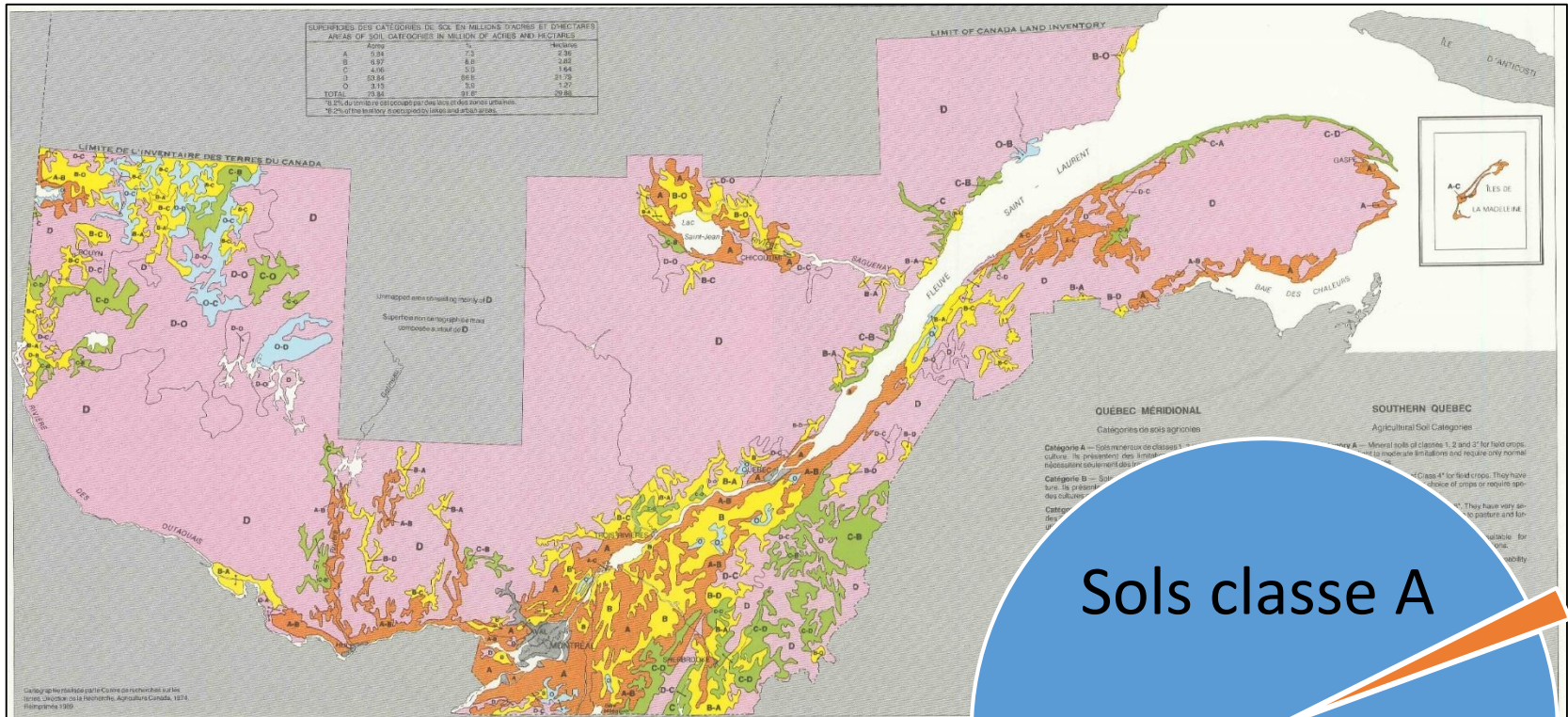
RÔLES DES SOLS

- 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



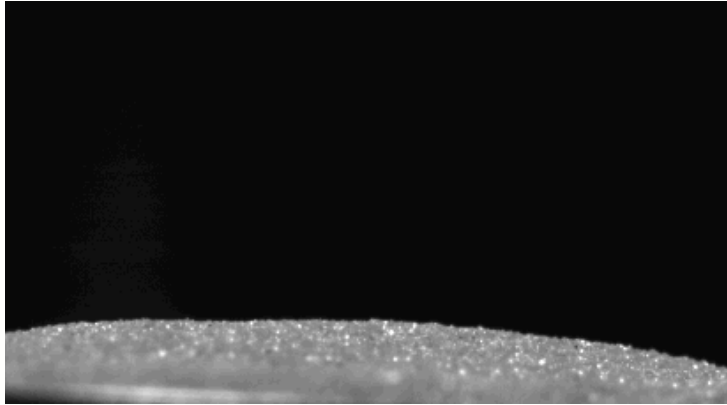
Lajoie, 1975

Sols classe A

2,36 Mha
(1,8 %)

FACTEURS AGGRAVANT

ÉROSIVITÉ DES PRÉCIPITATIONS



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

R = érosivité (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹)

E = énergie cinétique ($\frac{1}{2} m v^2$)
(MJ ha⁻¹)

I₃₀ = intensité max. 30-min
(mm h⁻¹)

Hauteur (mm)	Durée (h)	Int. moy. (mm h ⁻¹)	Int. 5 min. (mm h ⁻¹)	Érosion (t ha ⁻¹)
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

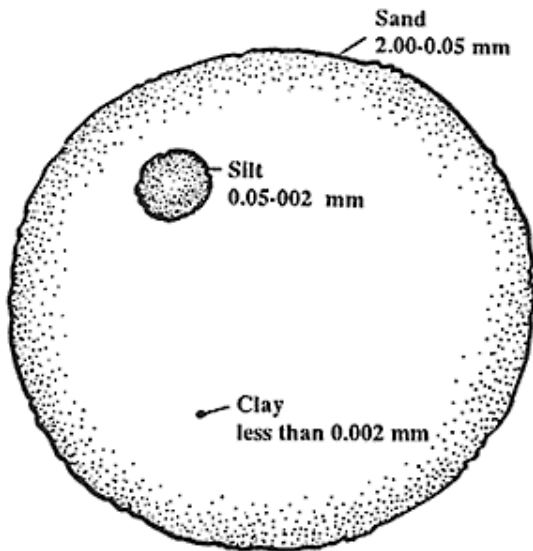
Dubé, 1975;

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)

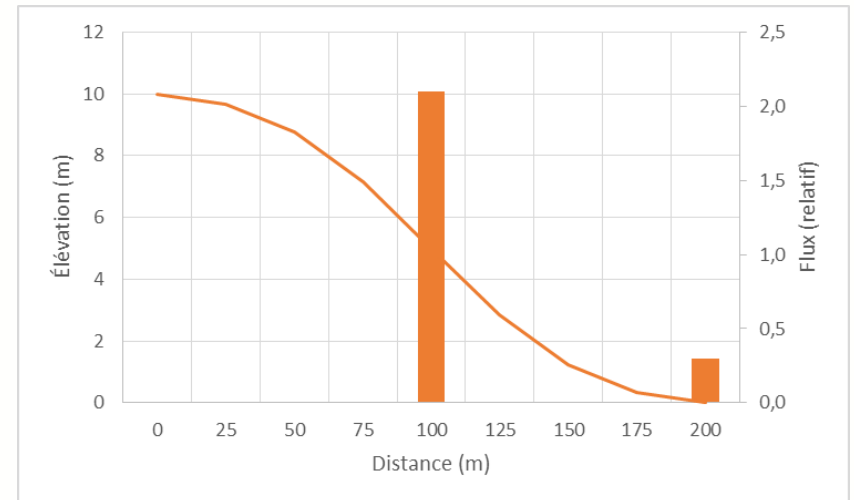
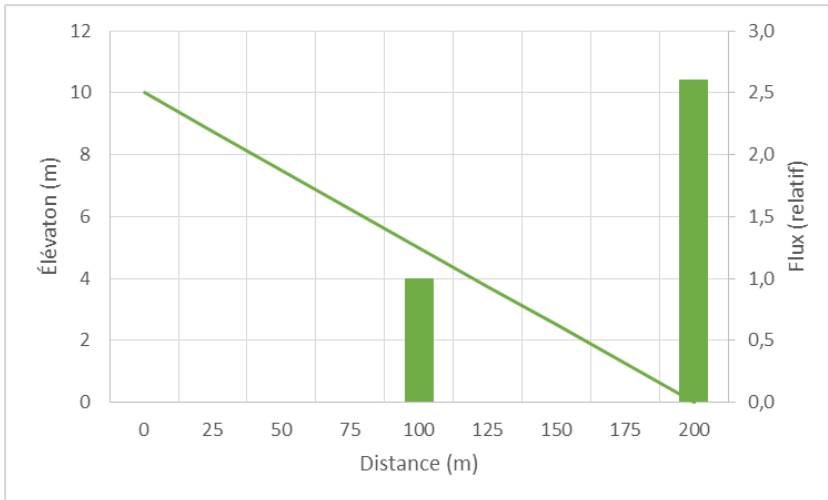
~ [Texture] [Matière organique] [Structure]
[Perméabilité]



	Arrachement	Transport
Argile	—	+
Limon	+	+
Sable	+	—

TOPOGRAPHIE

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



d'après Moore et Burch, 1986

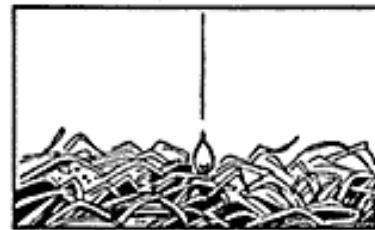
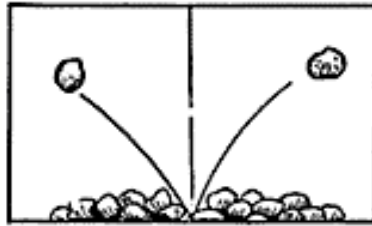
CULTURES

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:

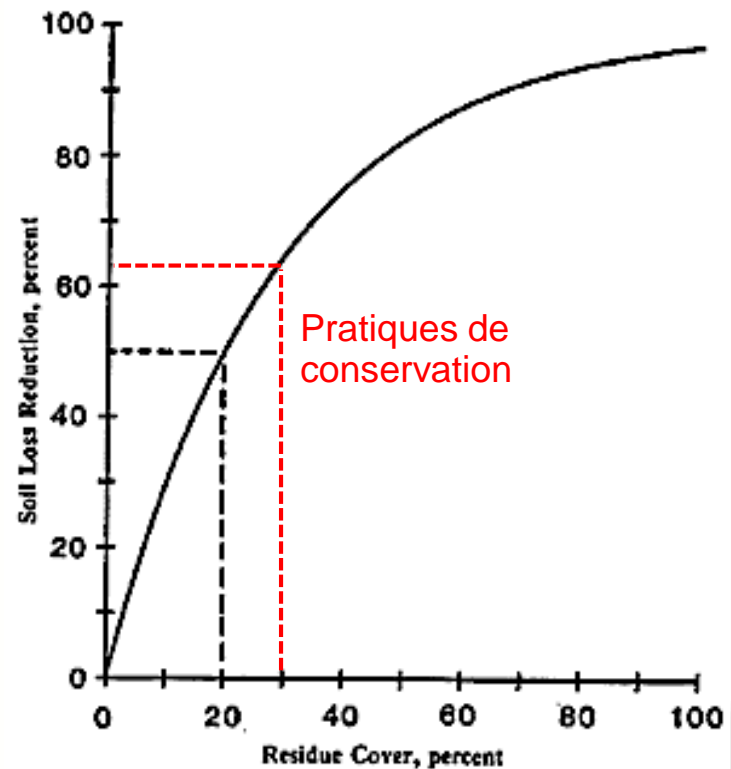
- absorbent l'énergie cinétique des pluies
- ralentissent le ruissellement
- accroissent l'infiltration

PRATIQUES CULTURALES

Type de labour

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

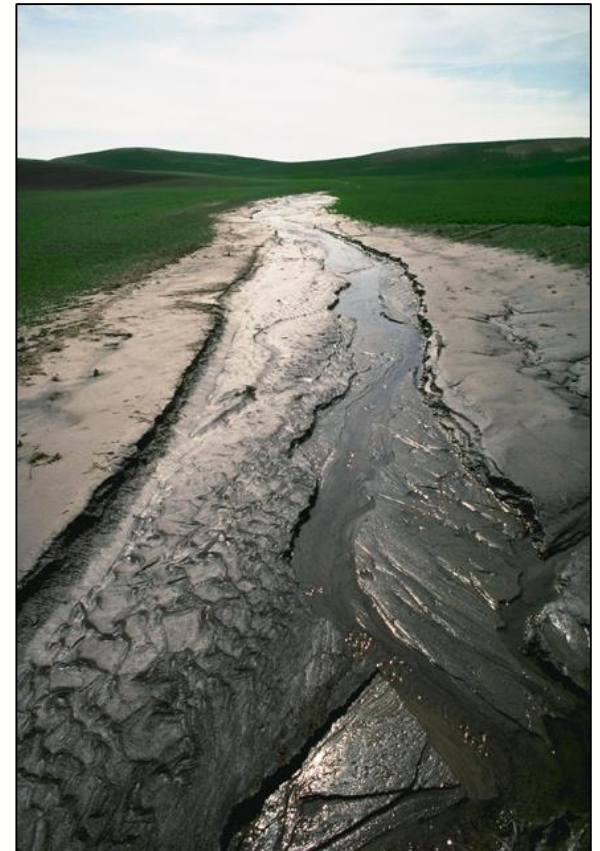
Quantité de résidus laissés en surface



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

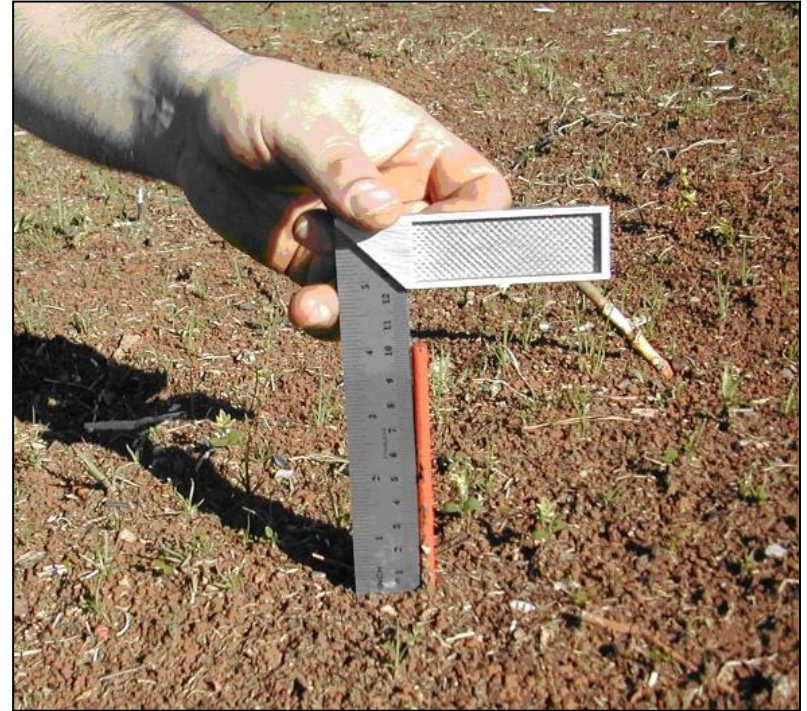
Soil erosion models

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 ± 1 mm soit ~ 12 t ha⁻¹



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



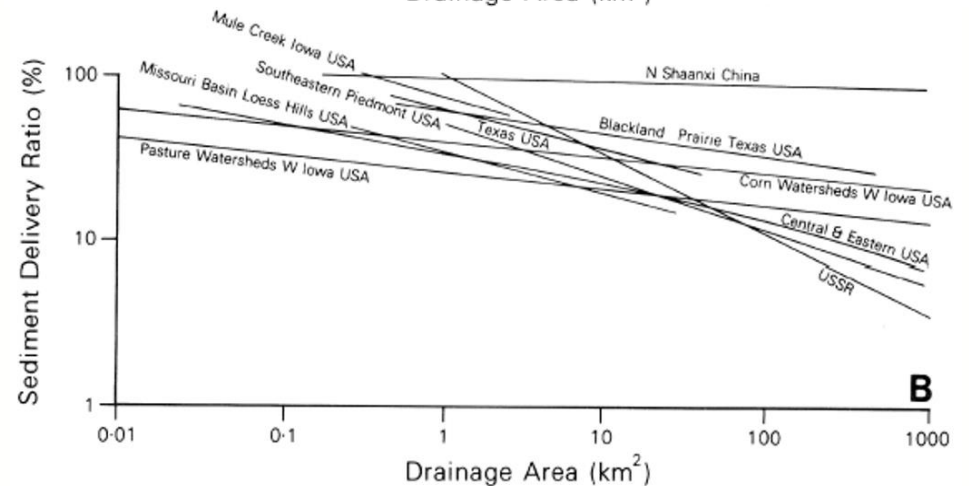
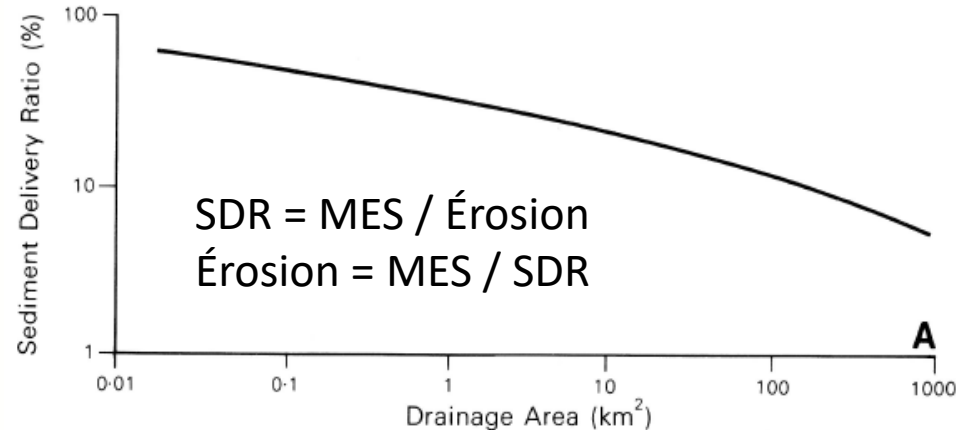
MESURE CHARGES SÉDIMENTS

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
(Bq m^{-2}) en mouvements de sol ($\text{t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$)

COMPLÉMENTARITÉ

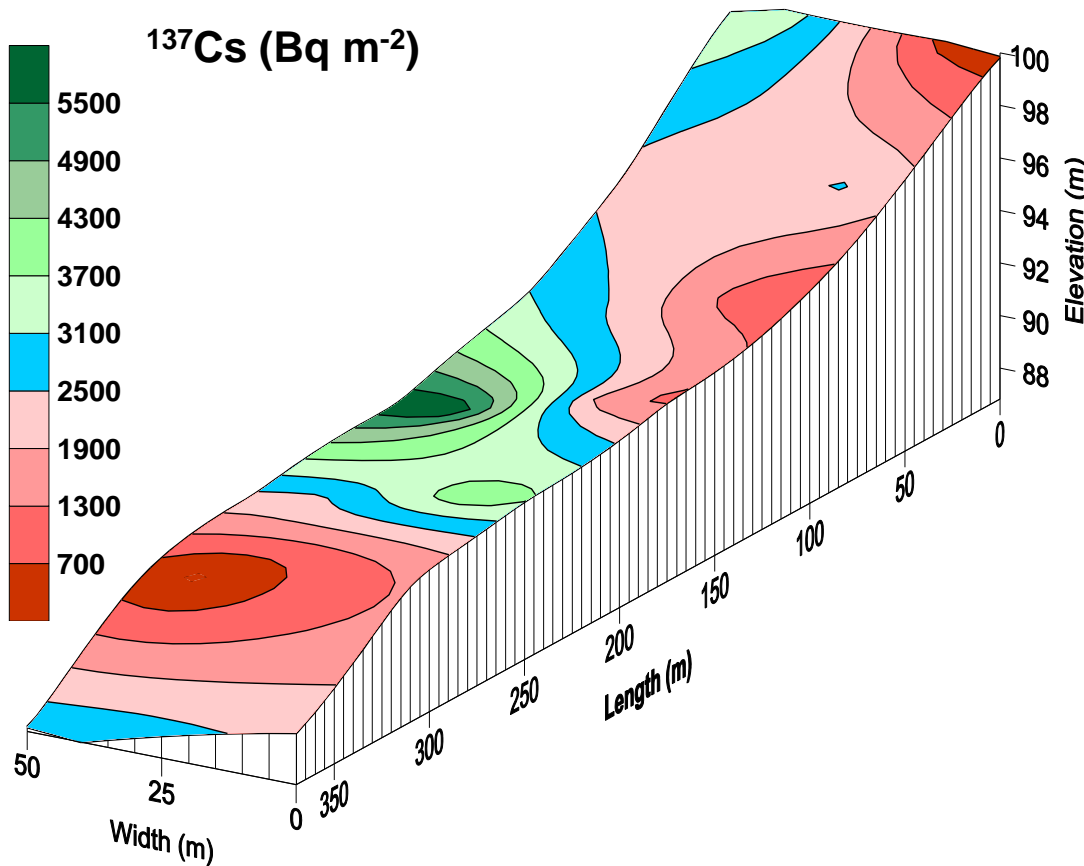
Conventionnelles

- 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
 - ^7Be : événement pluvieux
 - ^{137}Cs , $^{239-240}\text{Pu}$: 60 ans
 - ^{210}Pb : 100 ans
- redistribution spatiale révélée et quantifiée

BILAN PAR CHAMP



■ Stable : 16% superficie

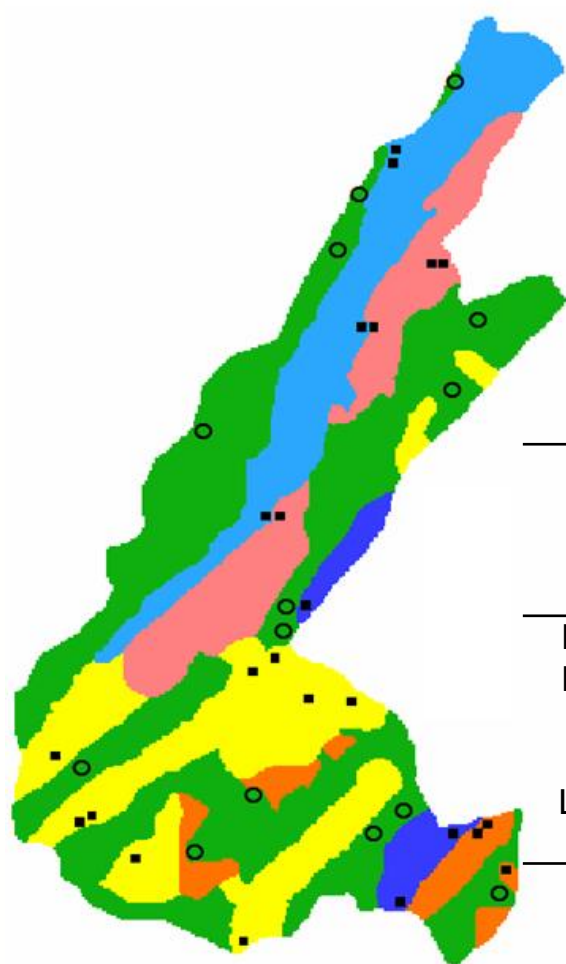
■ Perte :
67% @ 4.7 t ha⁻¹ an⁻¹

■ Déposition :
17% @ 0.7 t ha⁻¹ an⁻¹

Perte nette : 3 t ha⁻¹ an⁻¹

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%

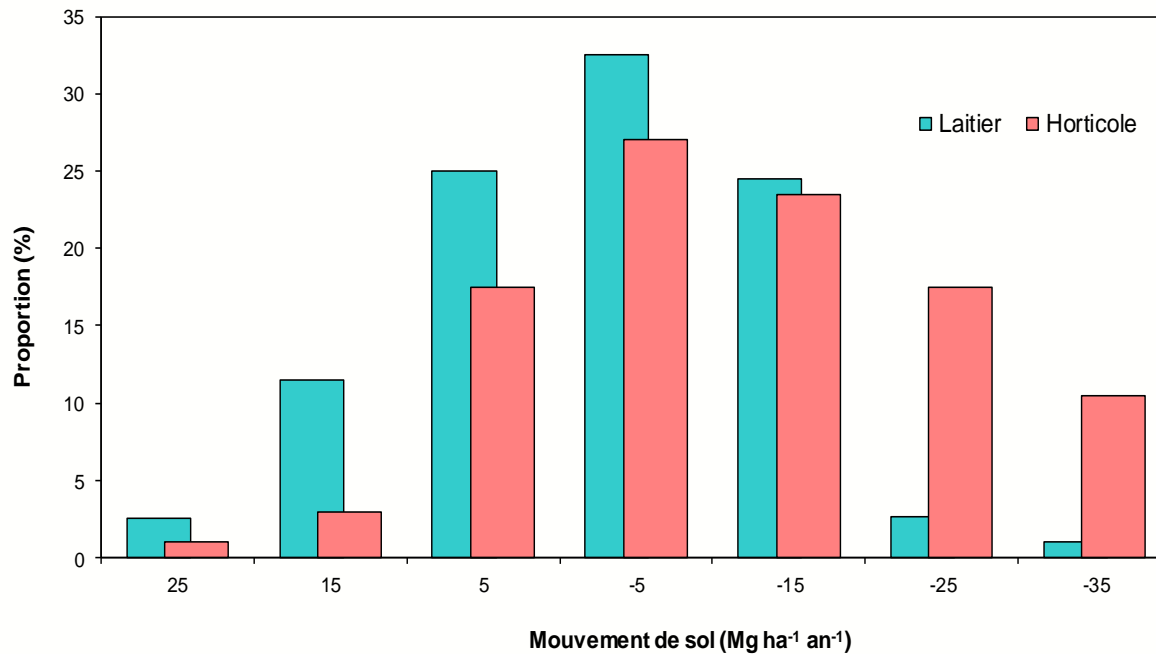
- Champs cultivés
- Sites de référence

Texture sol	Pente	Production MES des champs	Superficie isosecteur	Production MES des isosecteurs	Fraction de la production totale
	(%)	(t ha ⁻¹ an ⁻¹)	(ha)	(t an ⁻¹)	(%)
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
Total			12 270	60 771	100

Mabit et Bernard, 2008

INVENTAIRE RÉGIONAL

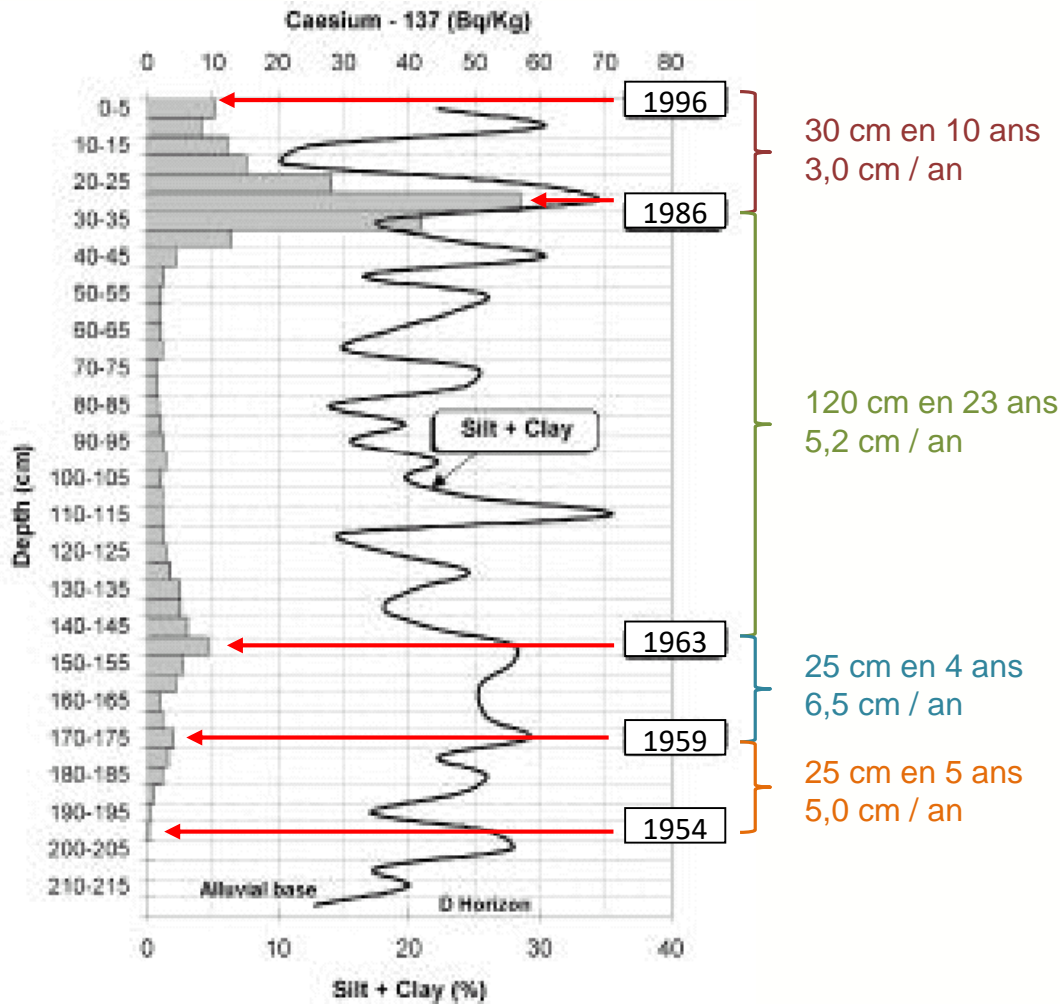
Île d'Orléans
63 champs; 1200+ points d'échantillonnage



Occupation du sol	Pente (%)	Perte nette (t ha ⁻¹ an ⁻¹)
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

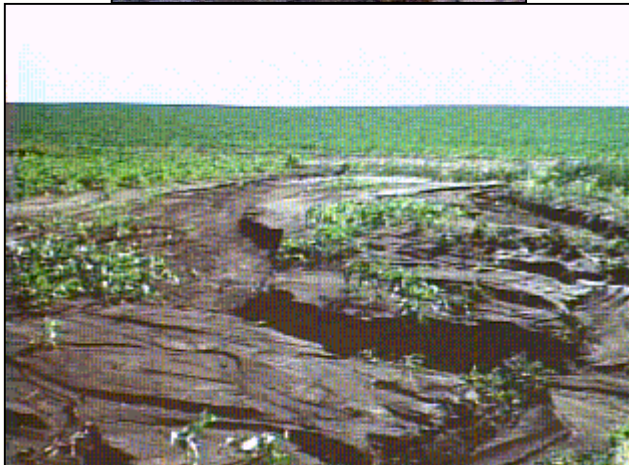
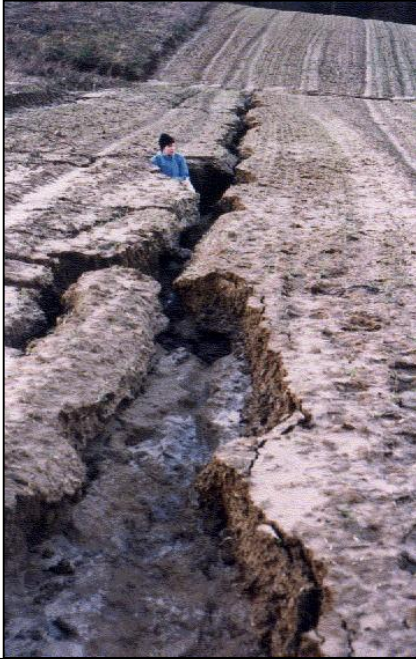


- 1996 – échantillonnage des sédiments
- 1986 – accident à Chernobyl
- 1963 – maximum des essais atomiques
- 1959 – accélération des essais atomiques
- 1954 – début des retombées de ^{137}Cs

Ionita et Margineanu, 2000

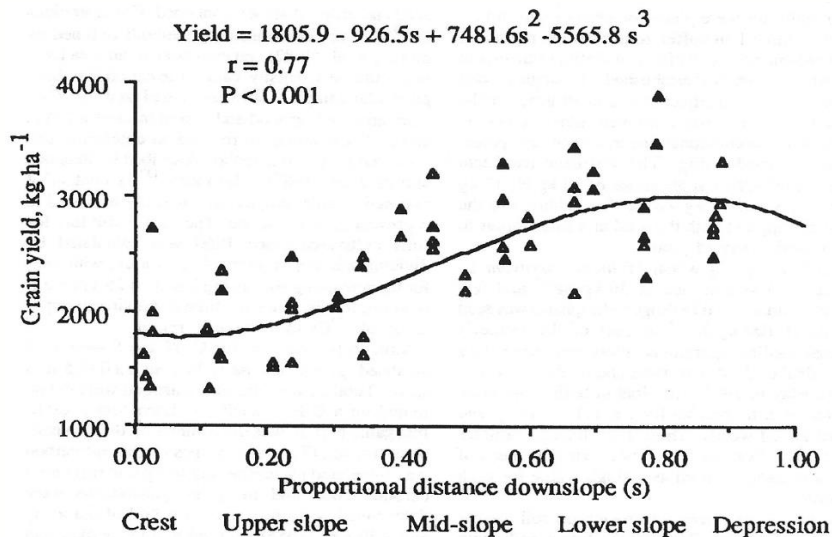
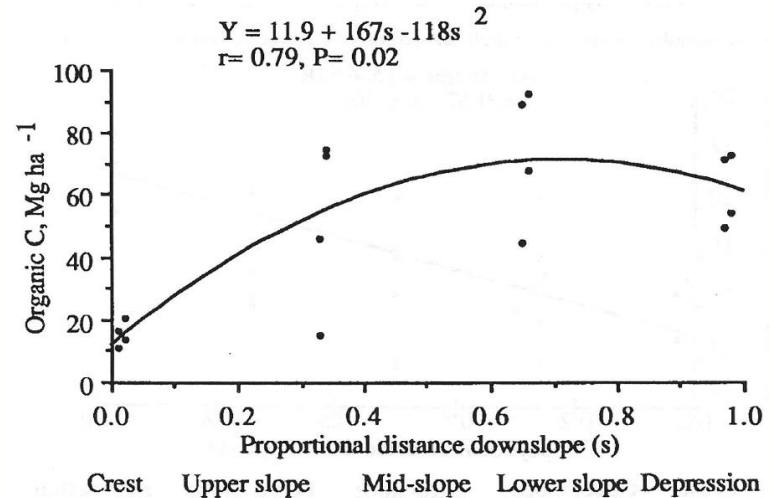
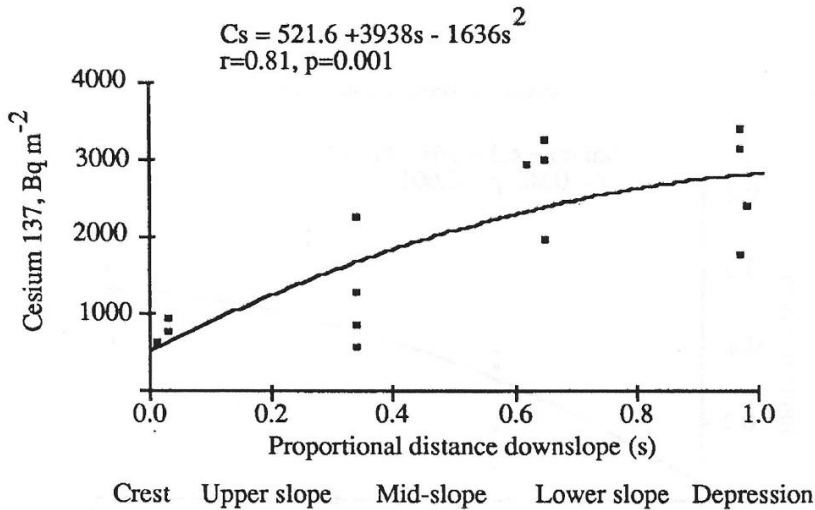
IMPACTS DE L'ÉROSION

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

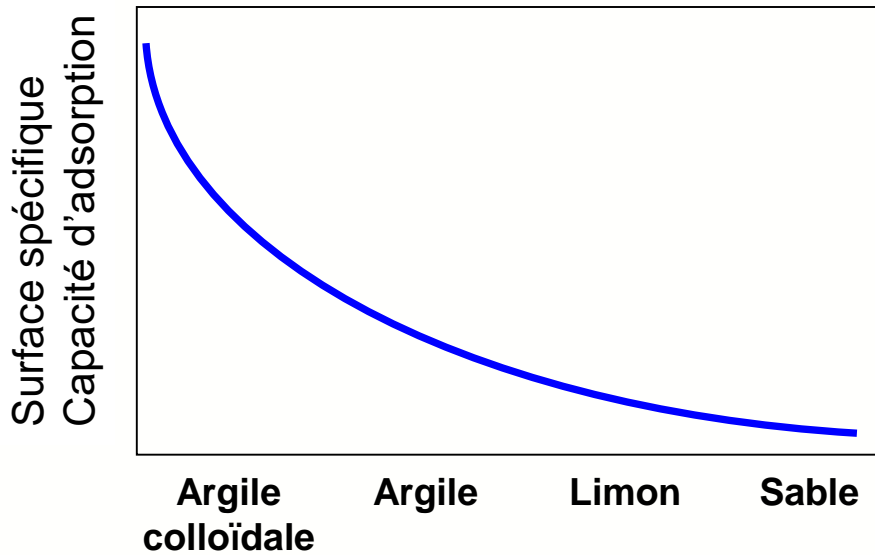
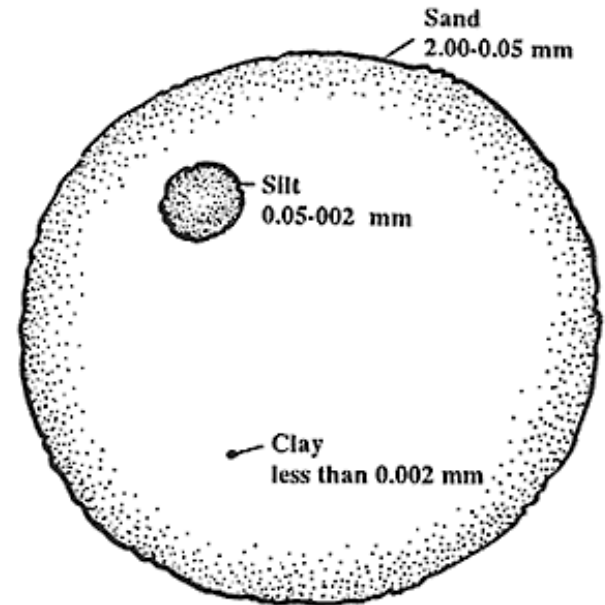
IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- 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 ² g ⁻¹)
Sable	4,4 * 10 ²
Limon	11,1 * 10 ⁴
Argile	7,4 * 10 ⁶

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

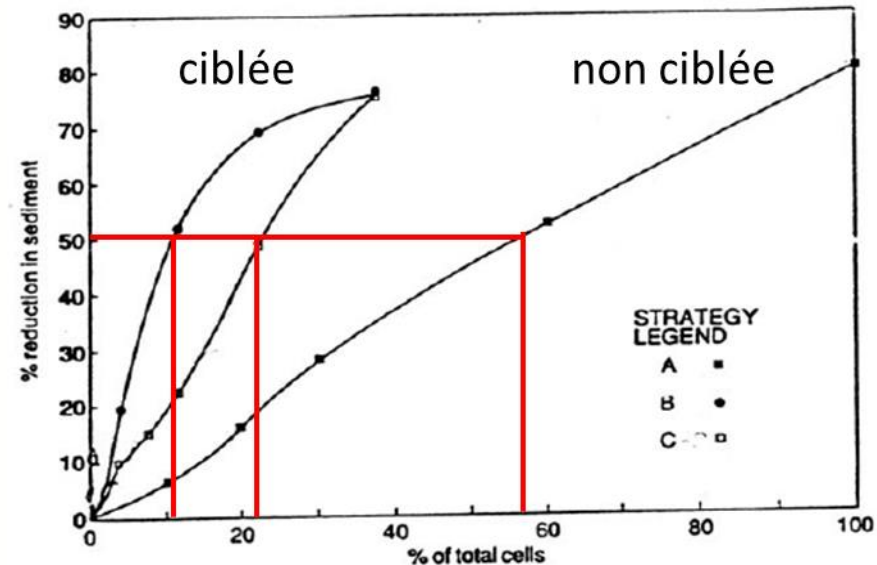
Productivité du sol

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 ₂ ↑ 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 ?