



**EROSION DES  
SOLS ET  
CONNECTIVITÉ  
SÉDIMENTAIRE À  
L'ANTHROPOCÈNE**

- **UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS**
- **D'UNE ÉROSION GÉOLOGIQUE À UNE ÉROSION ANTHROPIQUE**
- **COMPLEXITÉ DES PROCESSUS ET TRANSFERT D'ÉCHELLE**

# UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS

- Irréversibilité des processus



# COLLAPSE

HOW SOCIETIES CHOOSE  
TO FAIL OR SUCCEED

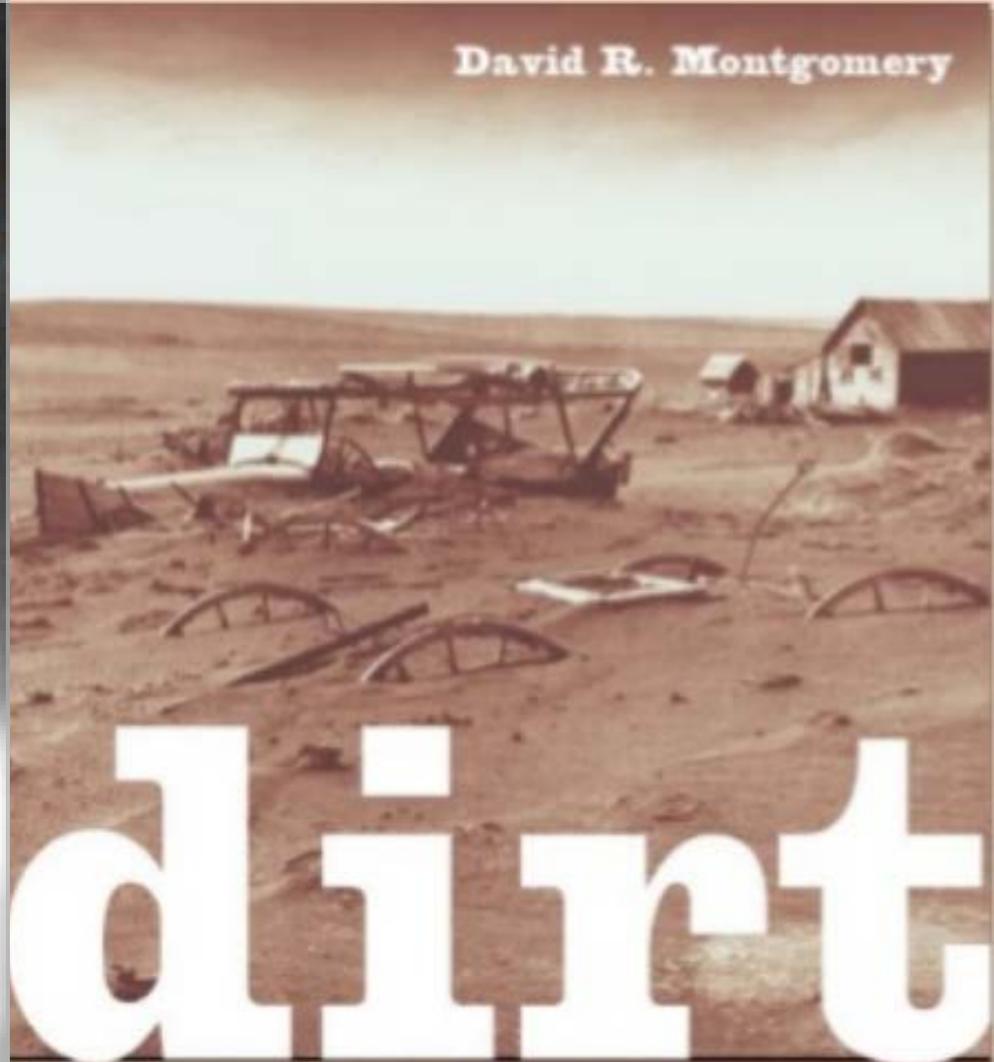
## JARED DIAMOND

Author of *GUNS, GERMS, and STEEL*

Winner of the PULITZER PRIZE



David R. Montgomery



The Erosion of Civilizations

# Erosion des sols rapidement dévastatrice dans les systèmes isolées

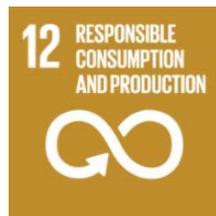
- Iles de Méditerranée
- Ile de paques
- ...





# UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS

- L'érosion des sols est pointé comme une des principales menaces qui pèsent sur nos sociétés



# UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS

- **L'érosion des sols est pourtant pointé comme une des principales menaces qui pèsent sur nos sociétés**

✓ À l'échelle globale, 5 enjeux selon la FAO :

1. *Soil erosion inhibits our ability to grow nutritious food.*
2. *Soil erosion leads to ecosystem degradation.*
3. *Soil erosion affects water supplies.*
4. *Soil erosion damages urban infrastructure.*
5. *Soil erosion contributes to poverty and can lead to migration*

*"Soil erosion must be stopped 'to save our future', says UN agriculture agency"*

# Why bother with soil erosion?





# Lebna Catchment (North Tunisia)





Dernière récolte ?



On dirait bien ...

**ET DANS  
LES PAYS AU  
DÉVELOPPEMENT  
RÉCENT ?**











**OK, MAIS TOUT ÇA C'EST LOIN, ET  
CHEZ NOUS ALORS ?**

# UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS

- L'érosion des sols est pourtant pointé comme une des principales menaces qui pèsent sur nos sociétés

✓ À l'échelle globale, 5 enjeux selon la FAO :

1. *Soil erosion inhibits our ability to grow nutritious food.*
2. *Soil erosion leads to ecosystem degradation.*
3. *Soil erosion affects water supplies.*
4. *Soil erosion damages urban infrastructure.*
5. *Soil erosion contributes to poverty and can lead to migration*

✓ **A l'échelle européenne**

*"The Thematic Strategy for Soil Protection identifies erosion as a key soil threats in the EU. (COM (2006) 231)"* → les mêmes enjeux s'appliquent

*"Soil erosion must be stopped 'to save our future', says UN agriculture agency"*

**LA SÉCURITÉ  
ALIMENTAIRE  
N'EST PAS À  
L'ORDRE DU  
JOUR DANS  
LES RÉGIONS  
TEMPÉRÉES ...**



# SONT CONSIDÉRÉS LES IMPACTS « HORS-SITE »

Flux de matière des  
surfaces continentales  
vers les océans

Barrages

Morphologie

Turbidité



Transfert de polluants



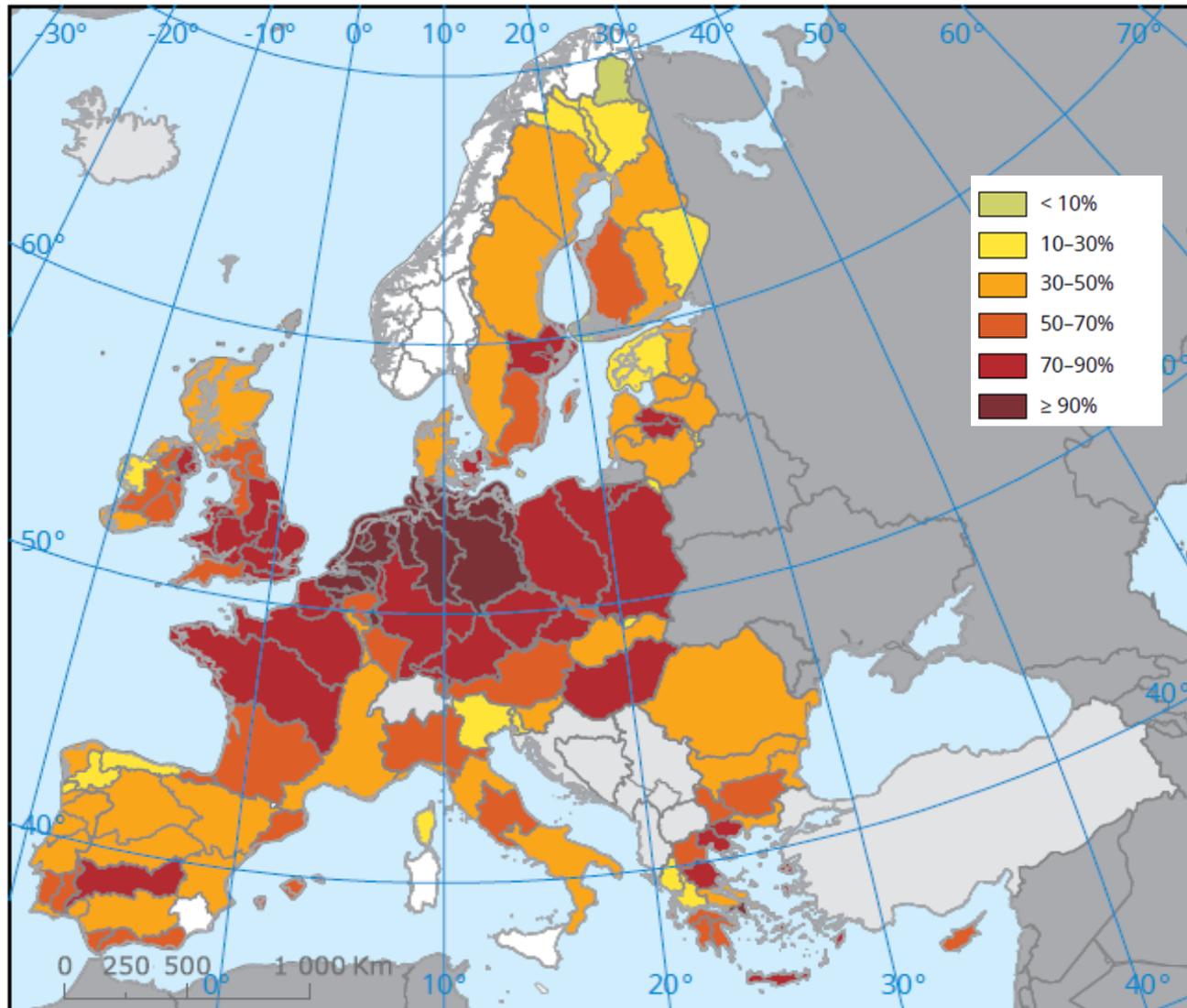
Cycles biogéochimiques



Transfert de nutriments



# Percentage of water bodies in less than good ecological status or potential in rivers and lakes



(European Environment Agency, 2015)

# UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS

- **Services écosystémiques rendus par les sols (C, Pool génétique, filtration ...)**
- **Sécurité alimentaire**
  - Désertification
  - Abandonnement des terres
  - Baisse des rendements
- **Dégradation des milieux récepteurs**
  - Envaselement des cours d'eau
  - Reprise et transfert de contaminants
  - Biodiversité des milieux récepteurs
- **Inondation et coulées boueuses**
  - Envaselement des routes
  - Dommages aux habitations et infrastructures
  - Envaselement des captages AEP



- **UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS**
- **D'UNE ÉROSION GÉOLOGIQUE À UNE ÉROSION ANTHROPIQUE**
- **COMPLEXITÉ DES PROCESSUS ET TRANSFERT D'ÉCHELLE**

# D'UNE ÉROSION GÉOLOGIQUE À UNE ÉROSION ANTHROPIQUE

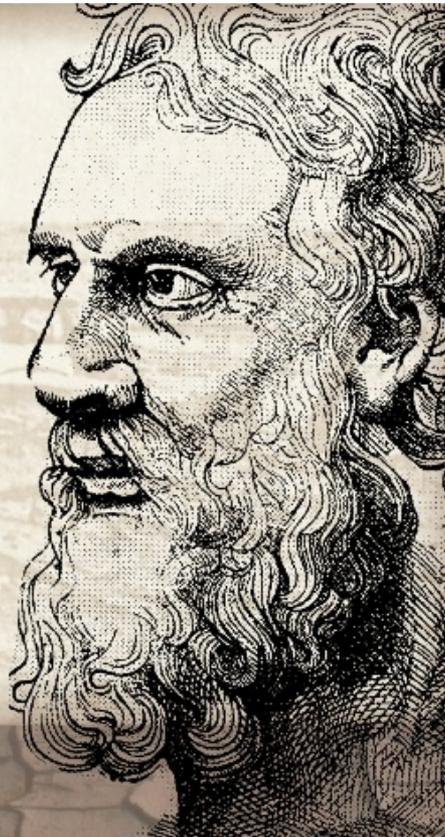
- humans “have become arguably the premier geomorphic agent sculpting the landscape,” Hooke's (2000)



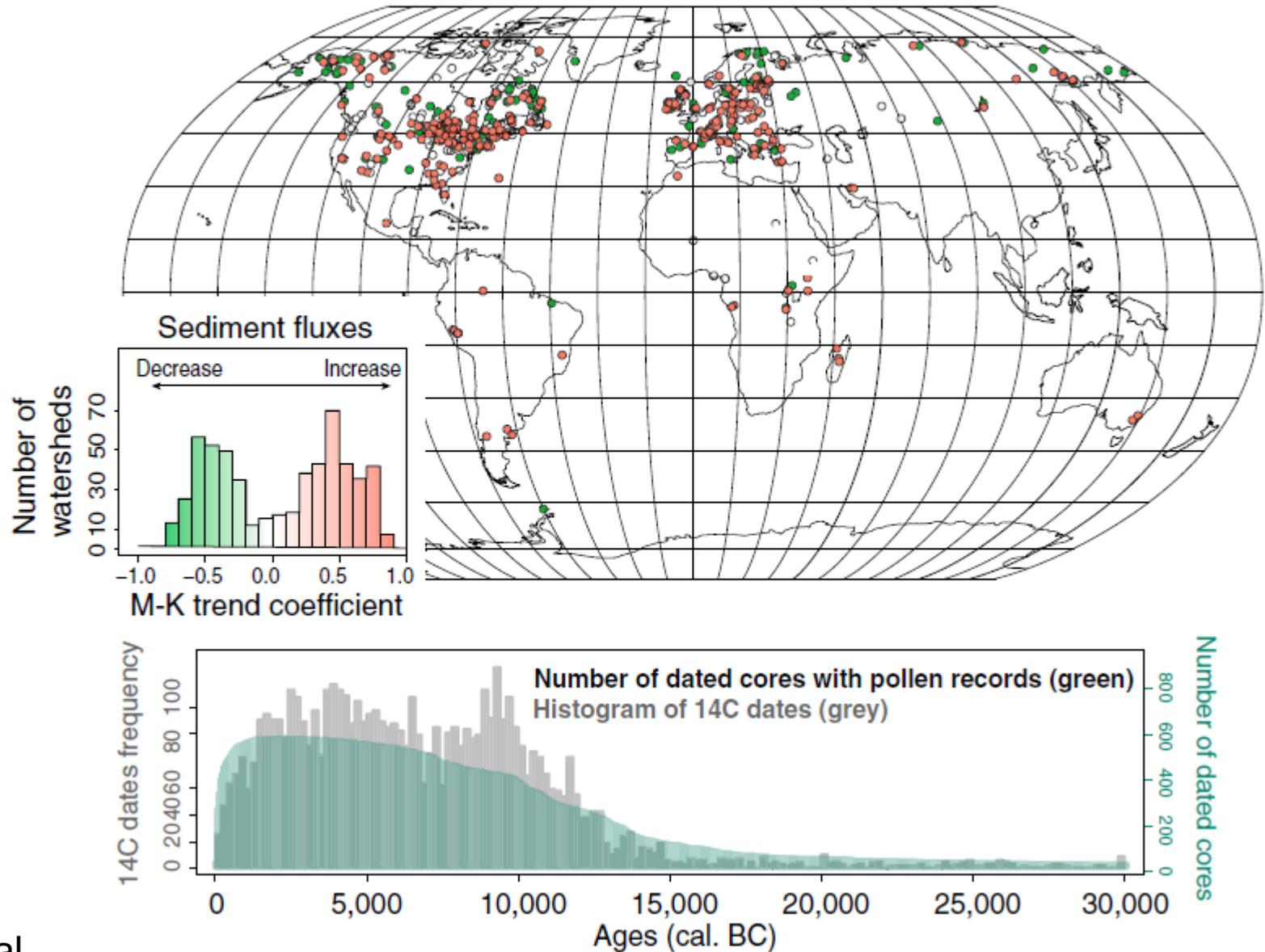
Plato

427-347 B.C.

The rich, soft soil has all run away leaving the land nothing but skin and bone. But in those days the damage had not taken place, the hills had high crests, the rocky plain of Phelleus was covered with rich soil, and the mountains were covered by thick woods, of which there are some traces today.

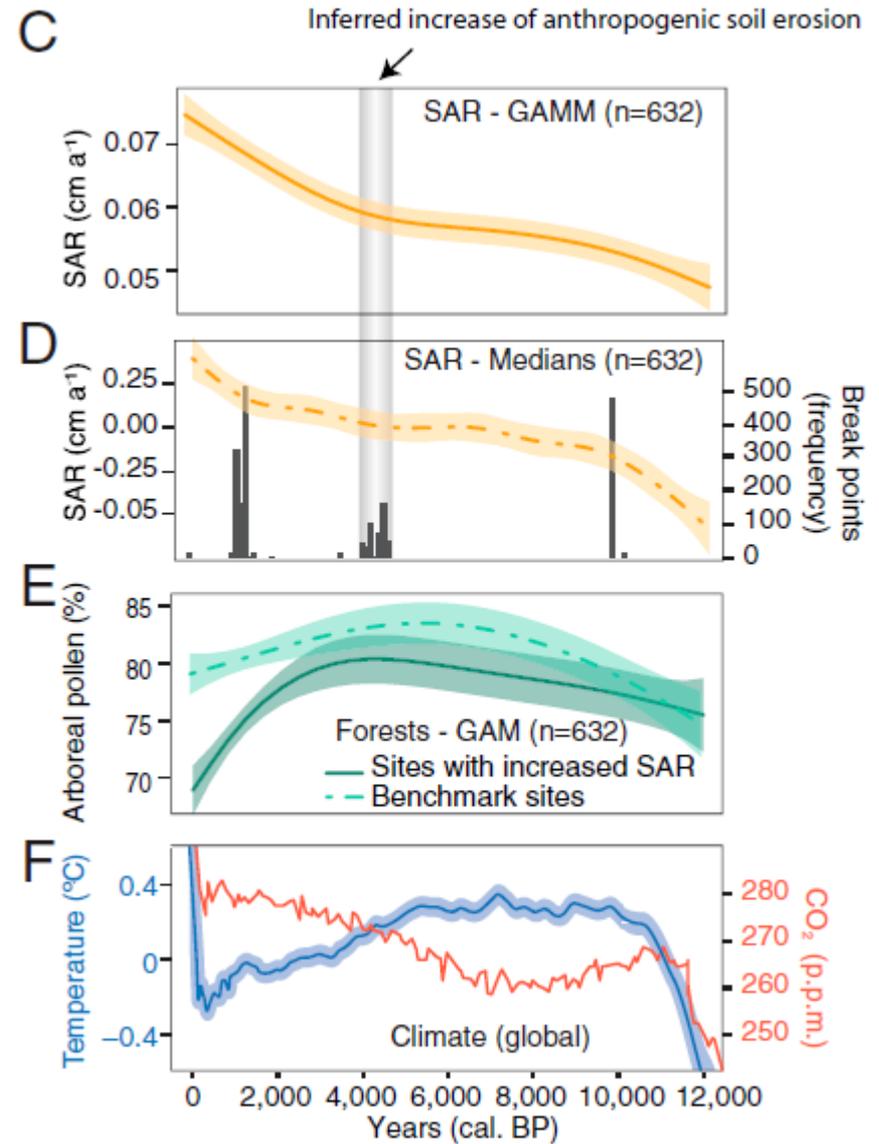


# LE FACTEUR HUMAIN



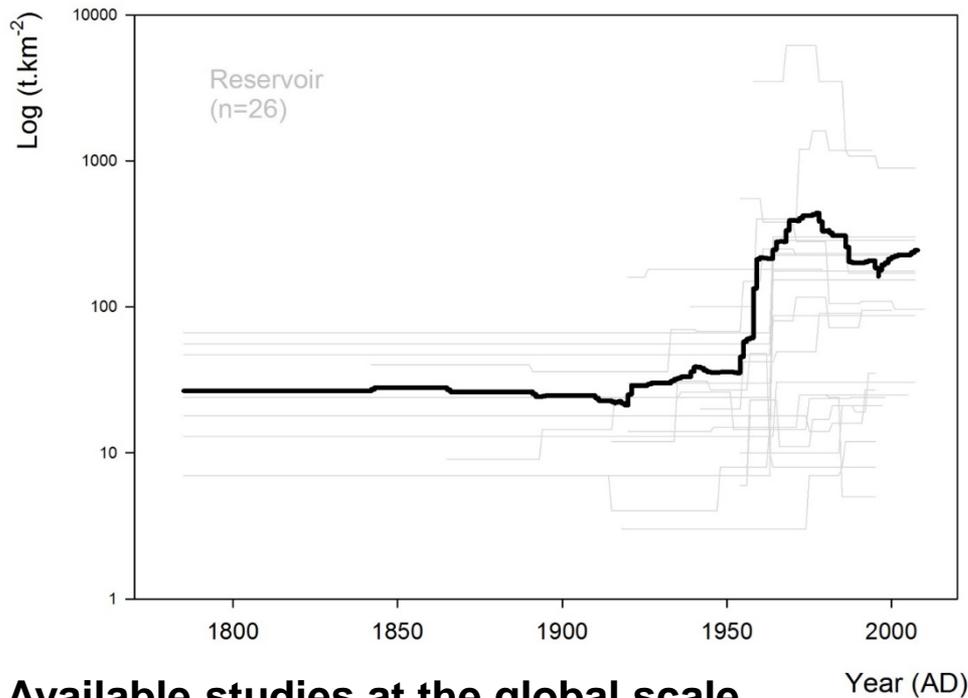
# LE FACTEUR HUMAIN -DÉFORESTATION

1<sup>ER</sup> IMPACT  
ANTHROPIQUE  
GLOBAL AUTOUR DE  
-4000 BP...

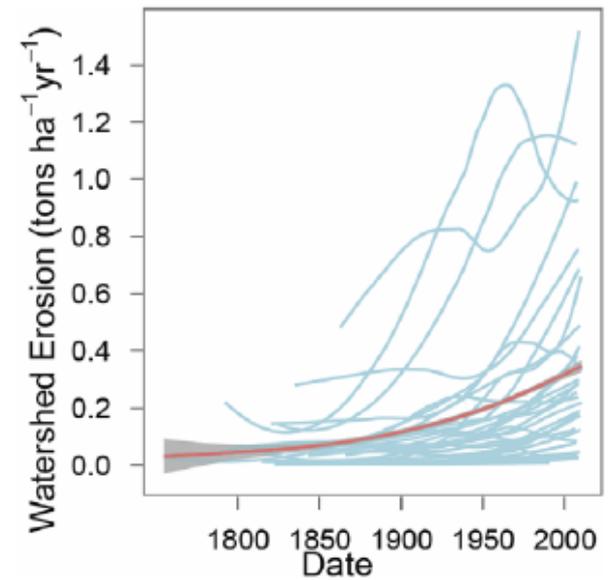


# LE FACTEUR HUMAIN

## 2<sup>ÈME</sup> PHASE « LA GRANDE ACCÉLÉRATION » POST 2<sup>ÈME</sup> GUERRE MONDIALE



Available studies at the global scale  
26 studies Foucher et al., In prep



Heathcote et al., 2013 – PlosOne  
32 lakes in the US Middle-west

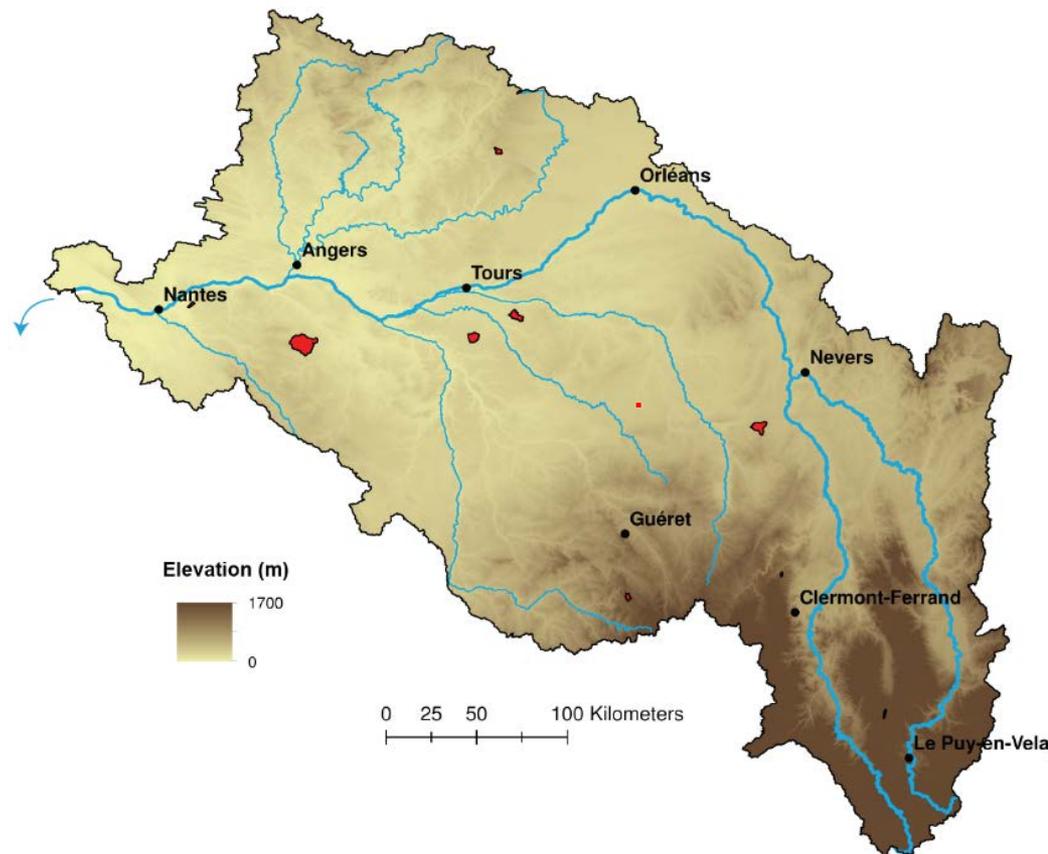


# UNE PÉRIODE D'ÉVOLUTIONS RAPIDES – EXEMPLE DE CHANGEMENT DEPUIS 1900

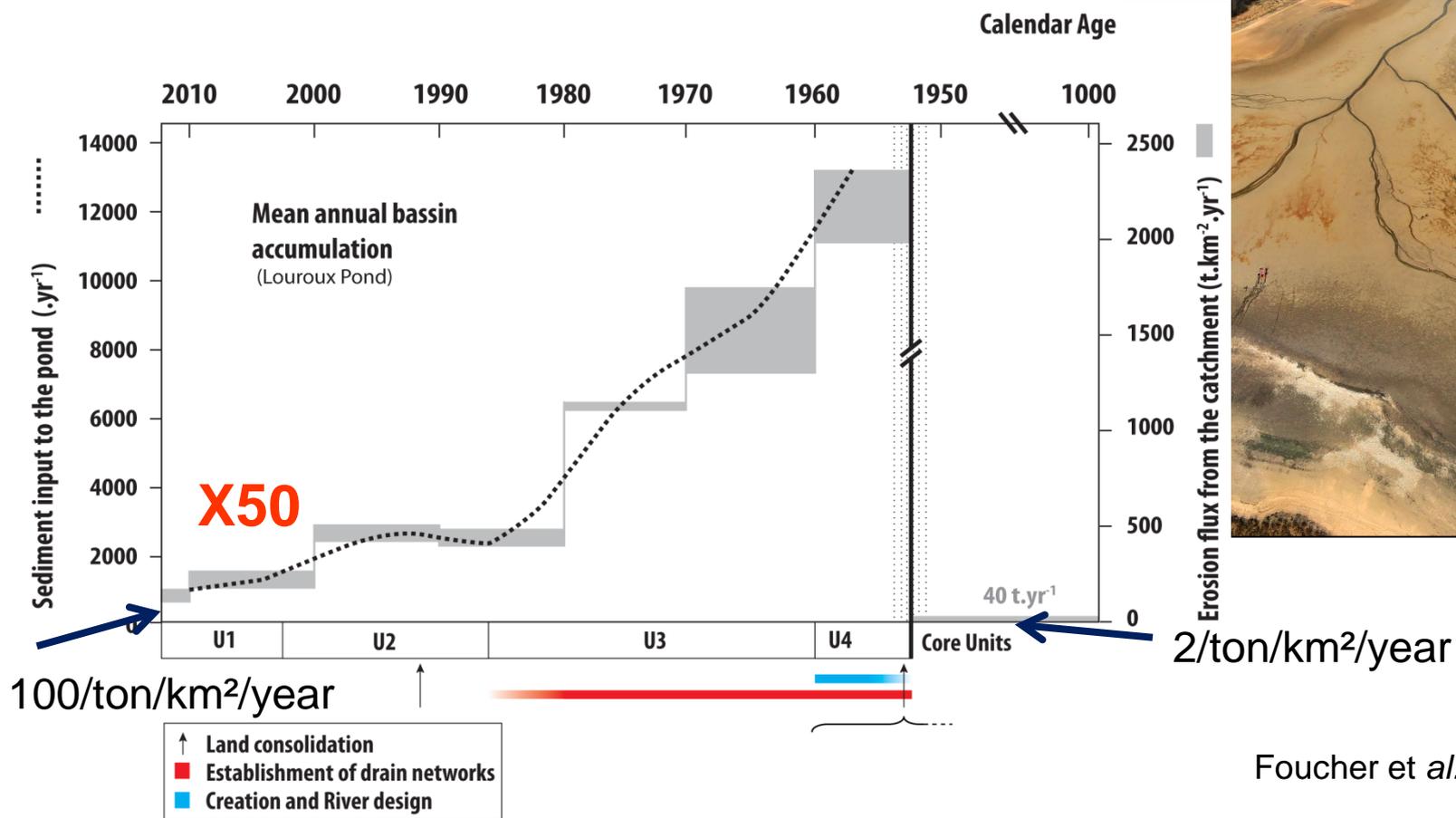
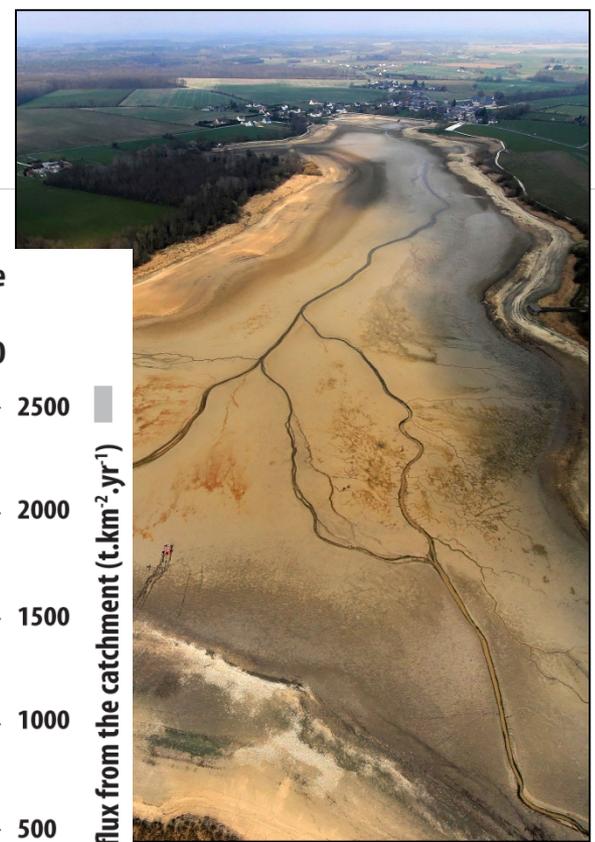
- **La population mondiale a été multipliée par 6**
- **La proportion de terre arable à presque doublé (+intensification)**
- **Les surfaces en forêt tropicales ont diminué de 25%**
- **Les barrages captent 40% des écoulements continentaux**
- **Développement de programme de conservation des sols**
- **Changement climatique**



# Résultats sur des bassins versants de la Loire



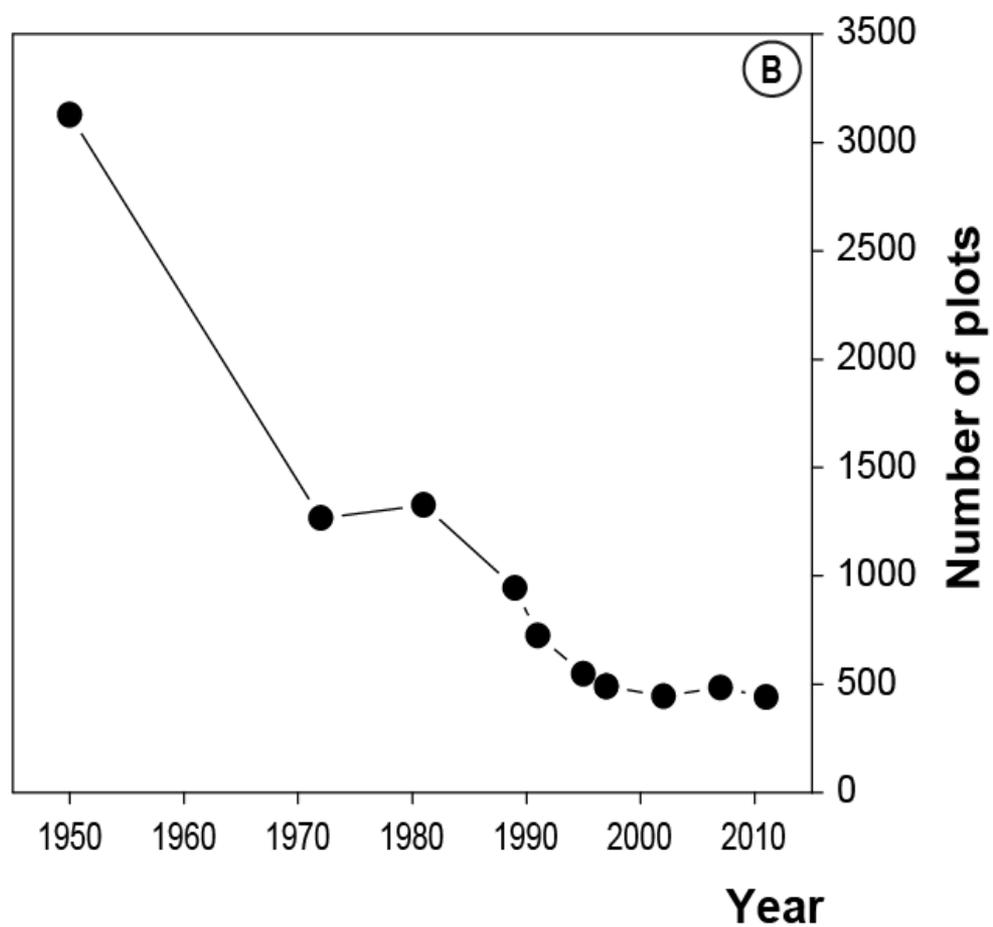
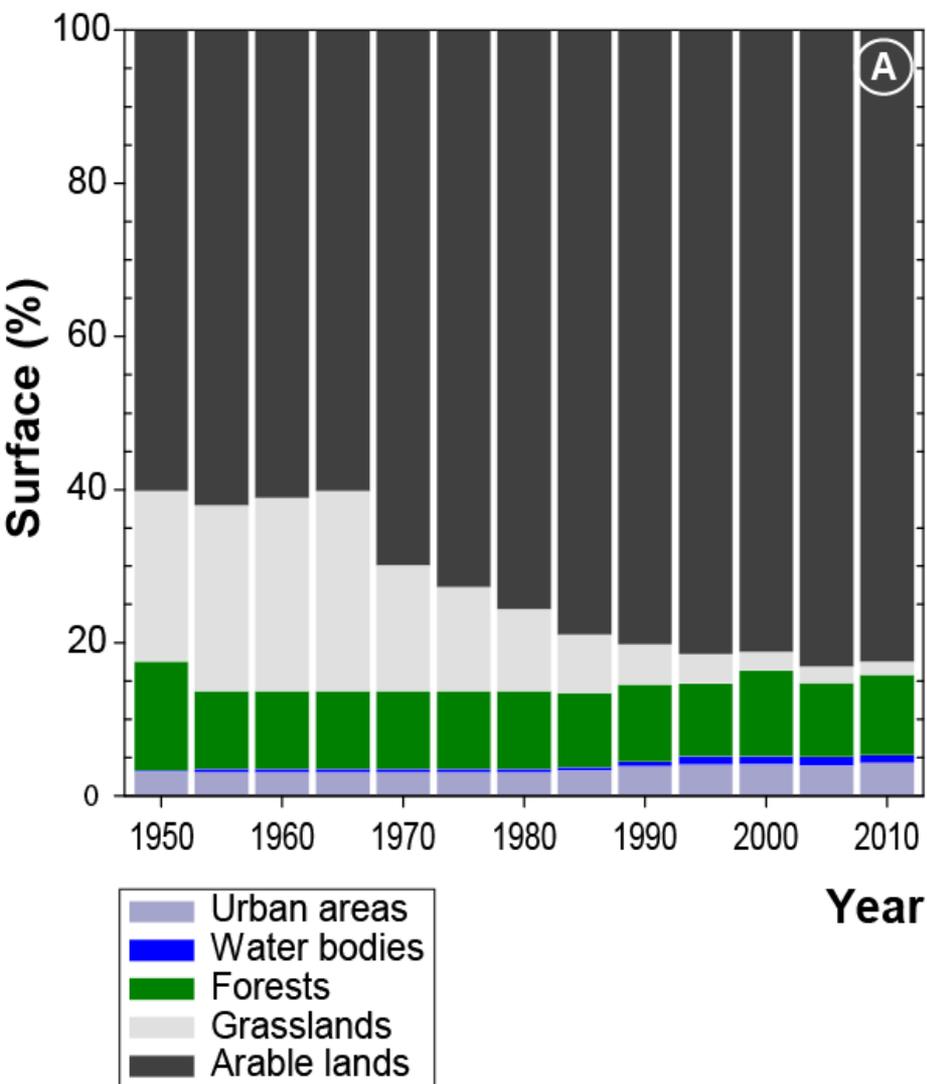
# LE LOUROUX - 70 ANS DE PRESSION ANTHROPIQUE



Foucher et al., anthropocene

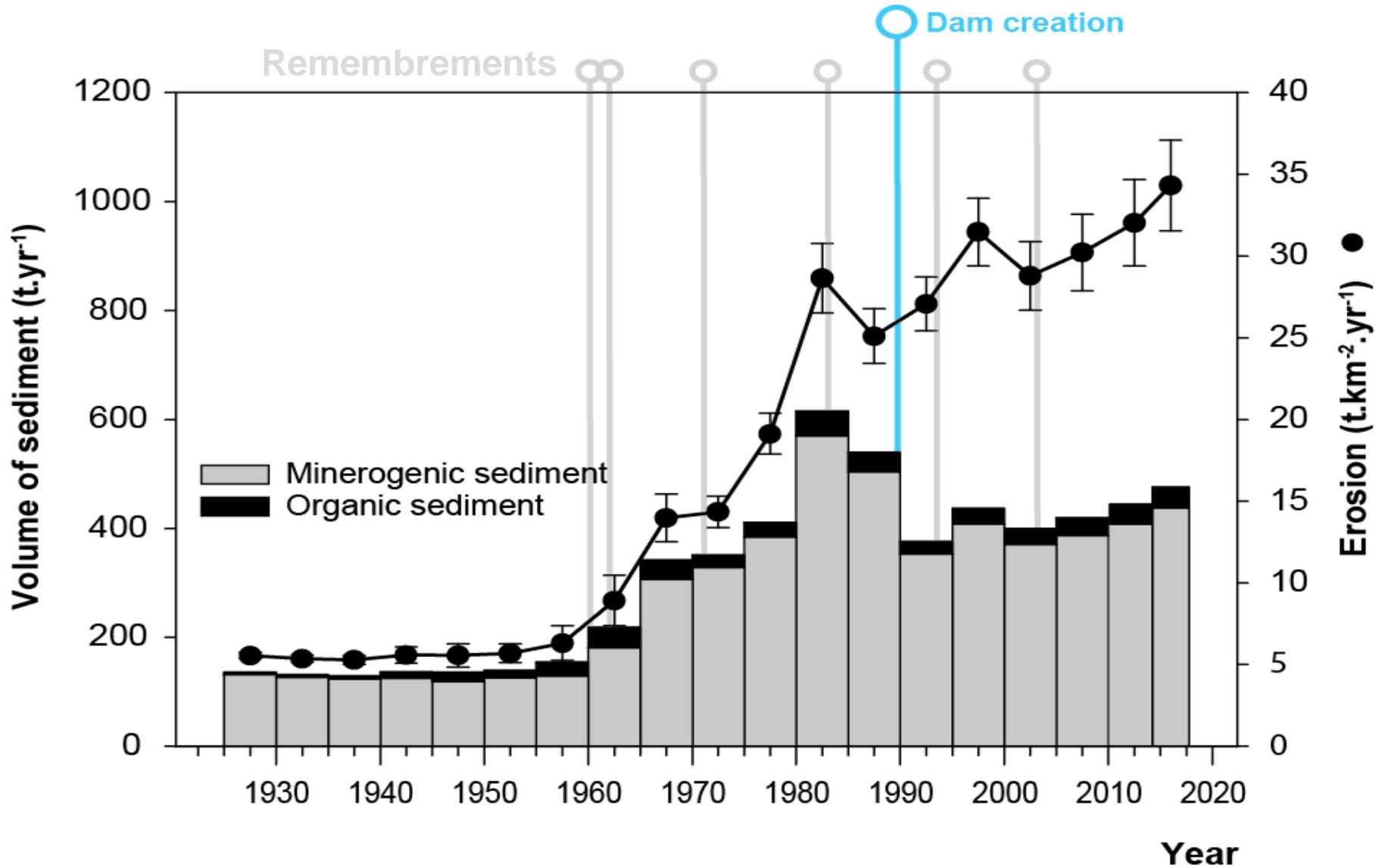
-> Entre 1500 et 3000 tons.a<sup>-1</sup> pendant les 10 dernières années

# LE BASIN VERSANT DE BROUSSE



Chabert

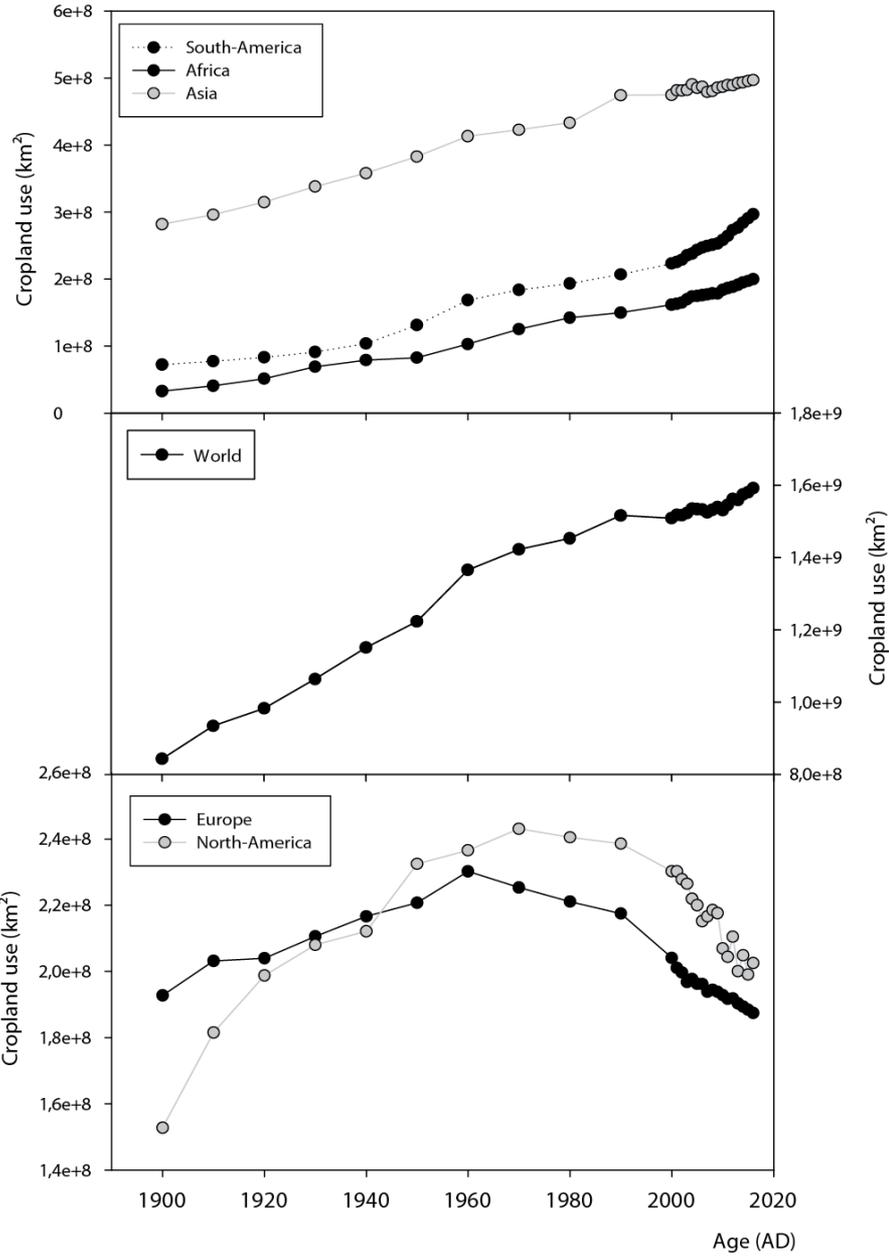
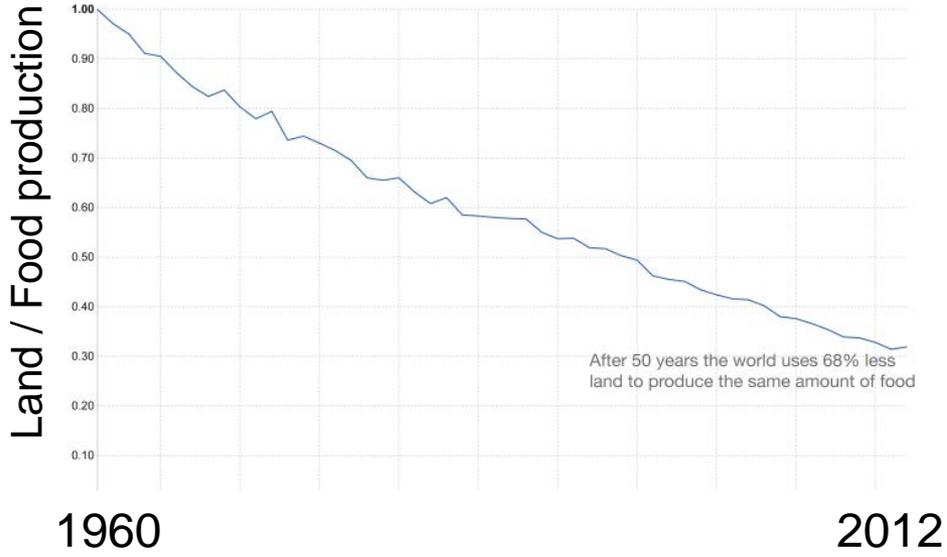
# LE BASIN VERSANT DE BROSSE



# LE FACTEUR HUMAIN DISPARITION DE NOTRE CIVILISATION ?

## Increase of cropland ?

68% Less land in 50 yrs to produce the same amount of food



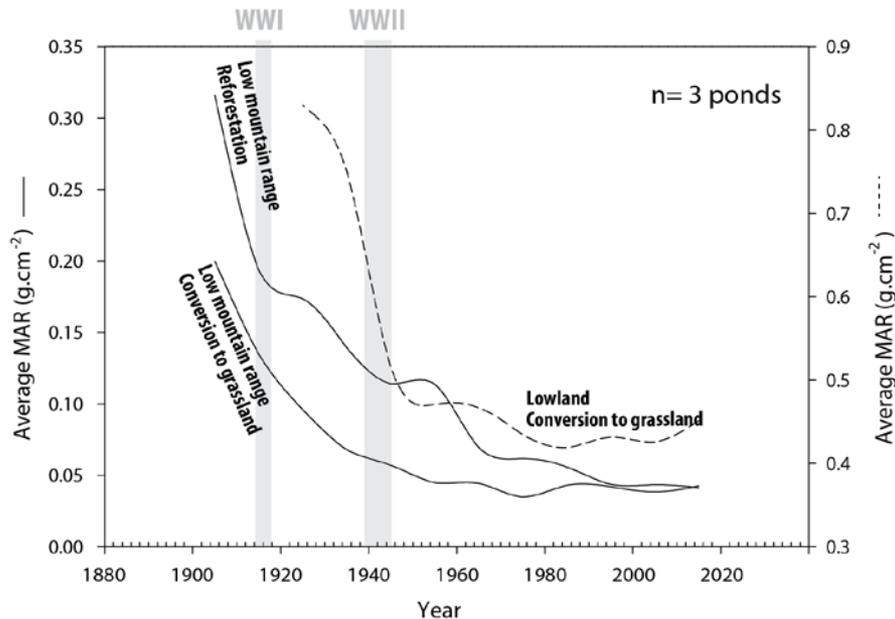
After HYDE database

# LE FACTEUR HUMAIN – DES TRAJECTOIRES DIVERSIFIÉES

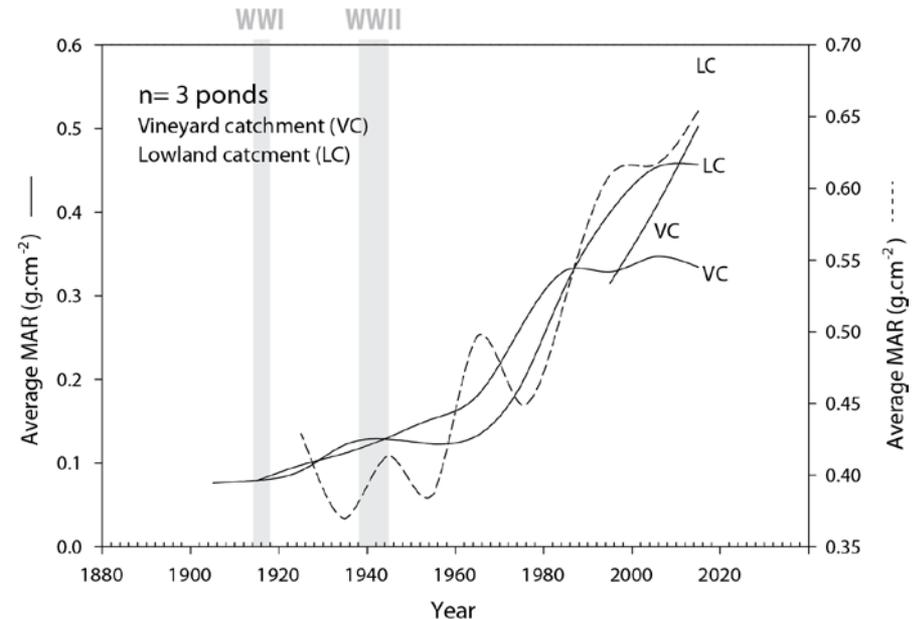
Foucher et al.,

Two mains trajectories at the Loire catchment scale for 6 catchments

Abandoned land trajectories



Productivist agriculture trajectories



**IMPLICATION : L'ÉROSION N'EST PAS UNE FATALITÉ**

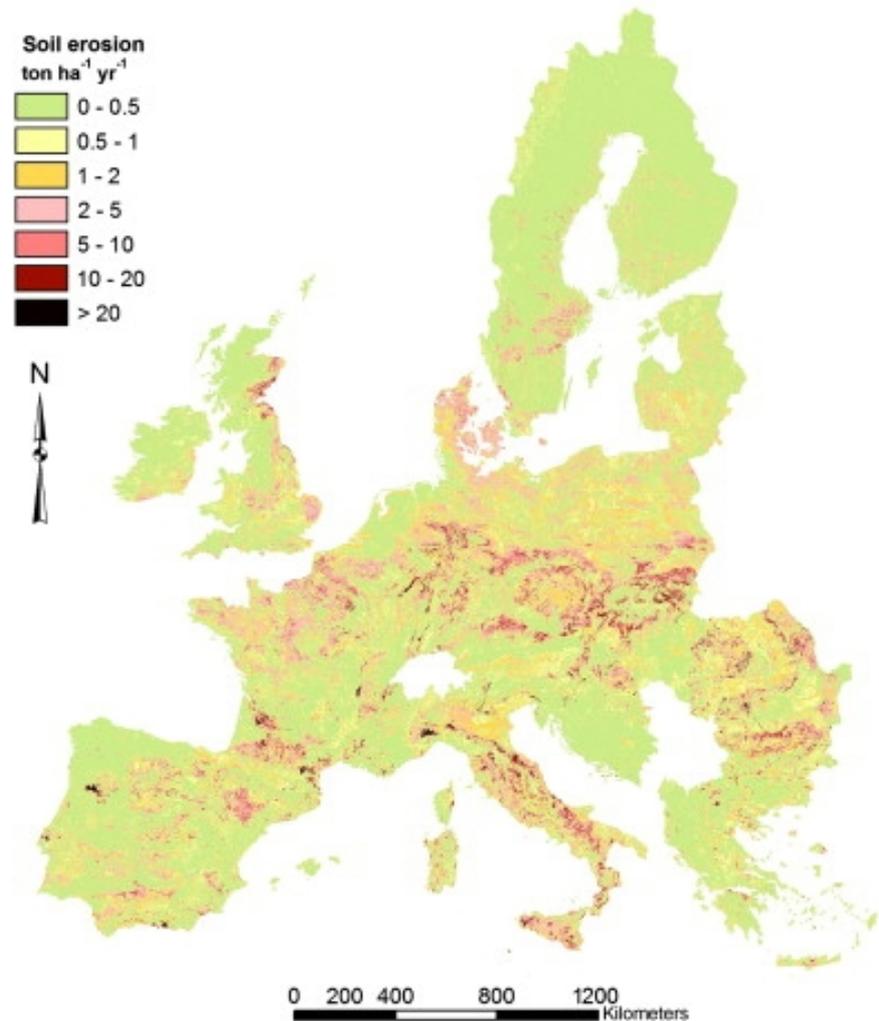
ET DONC ON PEUT AGIR ...

## MÉTHODOLOGIE POUR L'AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES

### Cartographie régionale de l'aléa

- Modèles empiriques
- MESALES (évolution)

- ✓ Étendu et intensité de l'aléa
- ✓ Hiérarchisation des zones à traiter



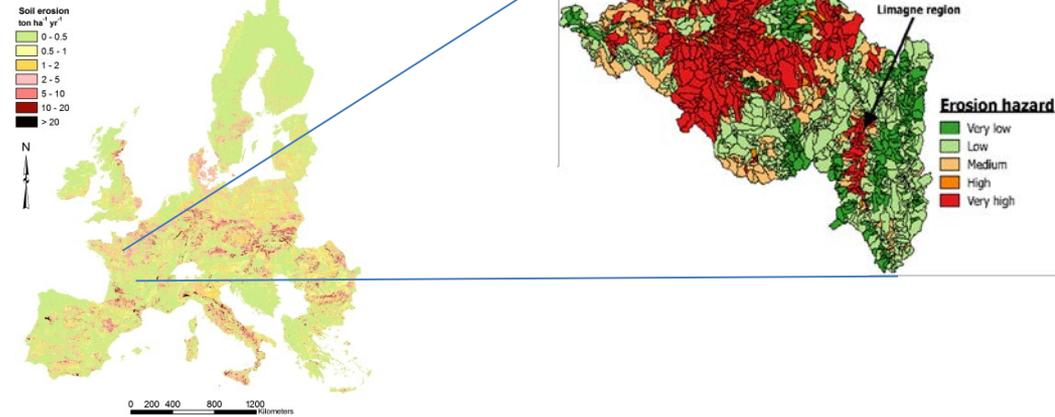
Cerdan et al., 2010

# ET DONC ON Y PEUT QUELQUE CHOSE

## Cartographie régionale de l'aléa

- Modèles empiriques
- MESALES (évolution)

- ✓ Étendu et intensité de l'aléa
- ✓ Hiérarchisation des zones à traiter



# ET DONC ON Y PEUT QUELQUE CHOSE

## Cartographie régionale de l'aléa

- Modèles empiriques
- MESALES (évolution)

- ✓ Étendu et intensité de l'aléa
- ✓ Hiérarchisation des zones à traiter

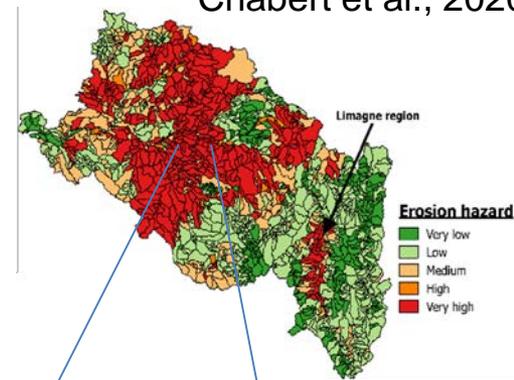
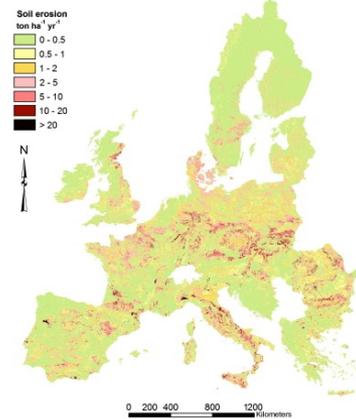
## Elaboration de modèle bassin versant

- STREAM, WaterSed
- Fullswof erosion

- ✓ Détermination des processus
- ✓ Quantification



**Simulation de scénario d'évolution / aménagement**



# CARACTÉRISATION DE L'ALÉA

2 types d'érosion sont modélisés



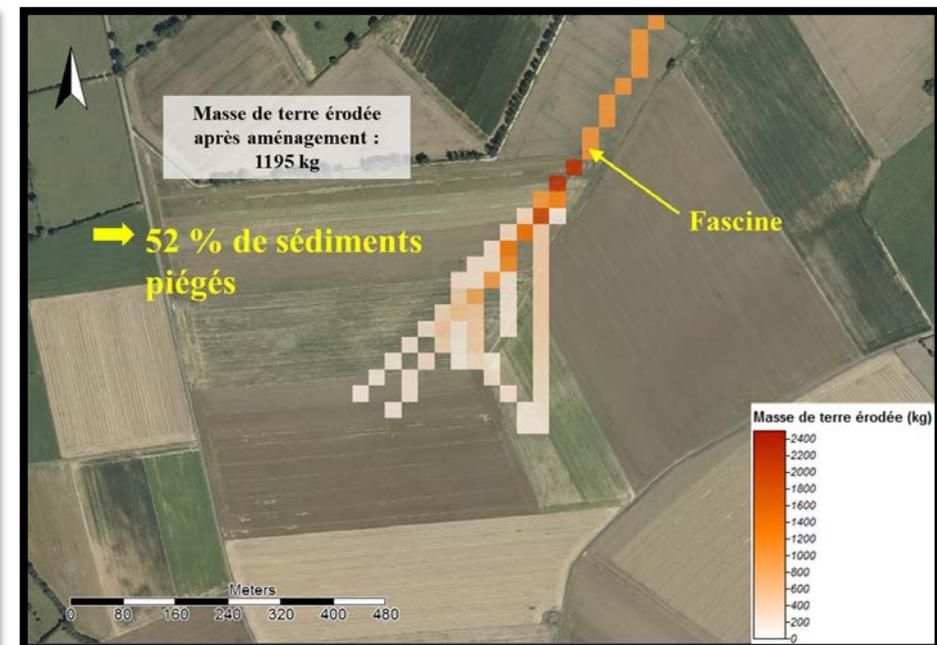
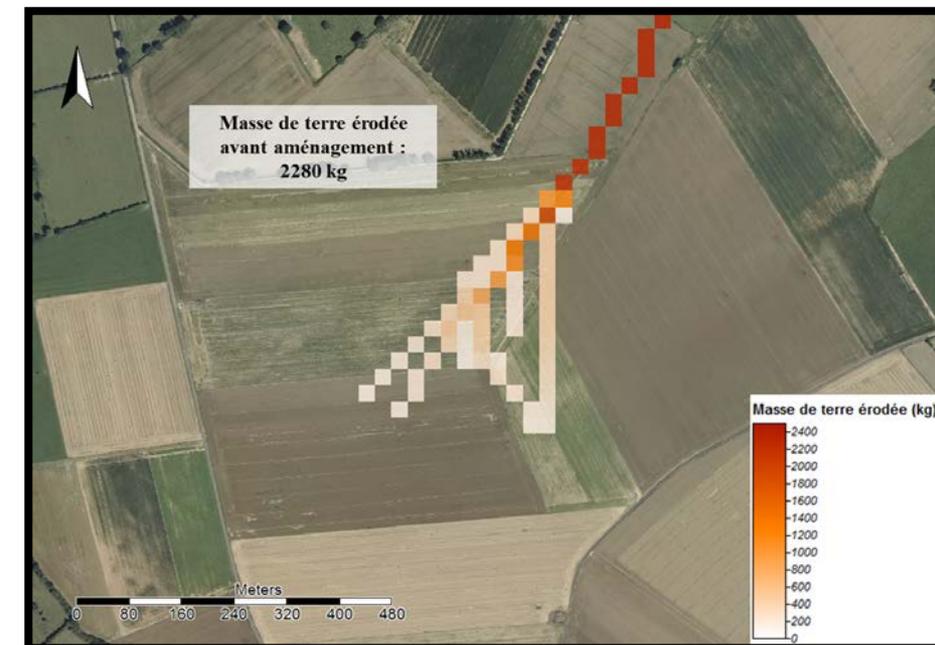
Erosion concentrée

Erosion diffuse

# PRÉSENTATION DE L'OUTILS WATERSED

## Module « aménagements »

- Possibilité de simuler des aménagements d'hydraulique douce (fascine, haie, bande enherbée) et des mares tampons avec déversoir (sans vannes de fond)



# STRATÉGIE D'AMÉNAGEMENT

- **Schémas d'aménagement de bassin**
  - Hydraulique douce
  - Pratique agricole
  - Bassins de rétention
  - Protection de captage
- **Scénarios de changement**
  - Climatiques
  - Occupation du sol
  - Feux de forêt
- **Perspective sur le transport particulaire**
  - Diffusion de radionucléide suite à accident nucléaire
  - Export d'intrant agricoles
  - Polluants émergents
  - Reprise de pollutions historiques



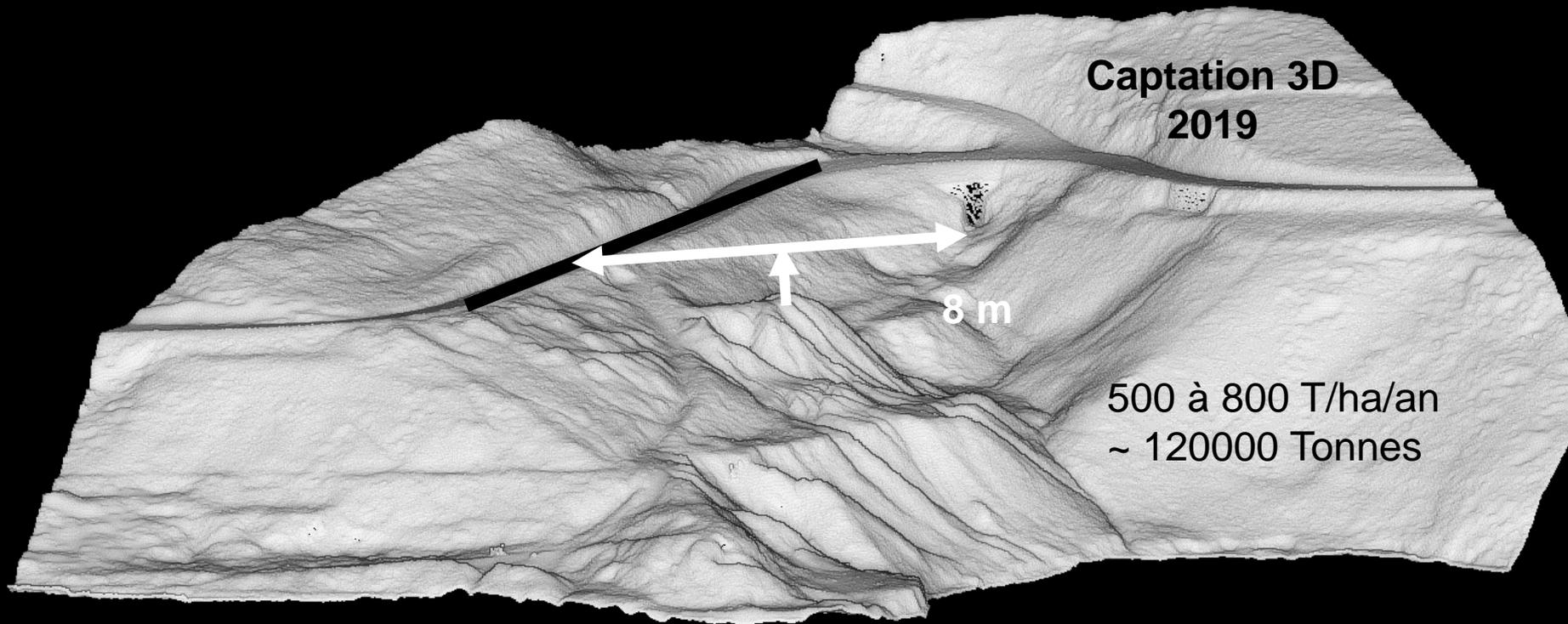
## REPRISE DE POLLUTION HISTORIQUE

- Exemple de concession octroyée par décret impérial du 26/06/1869. Arrêt de l'exploitation en 1901



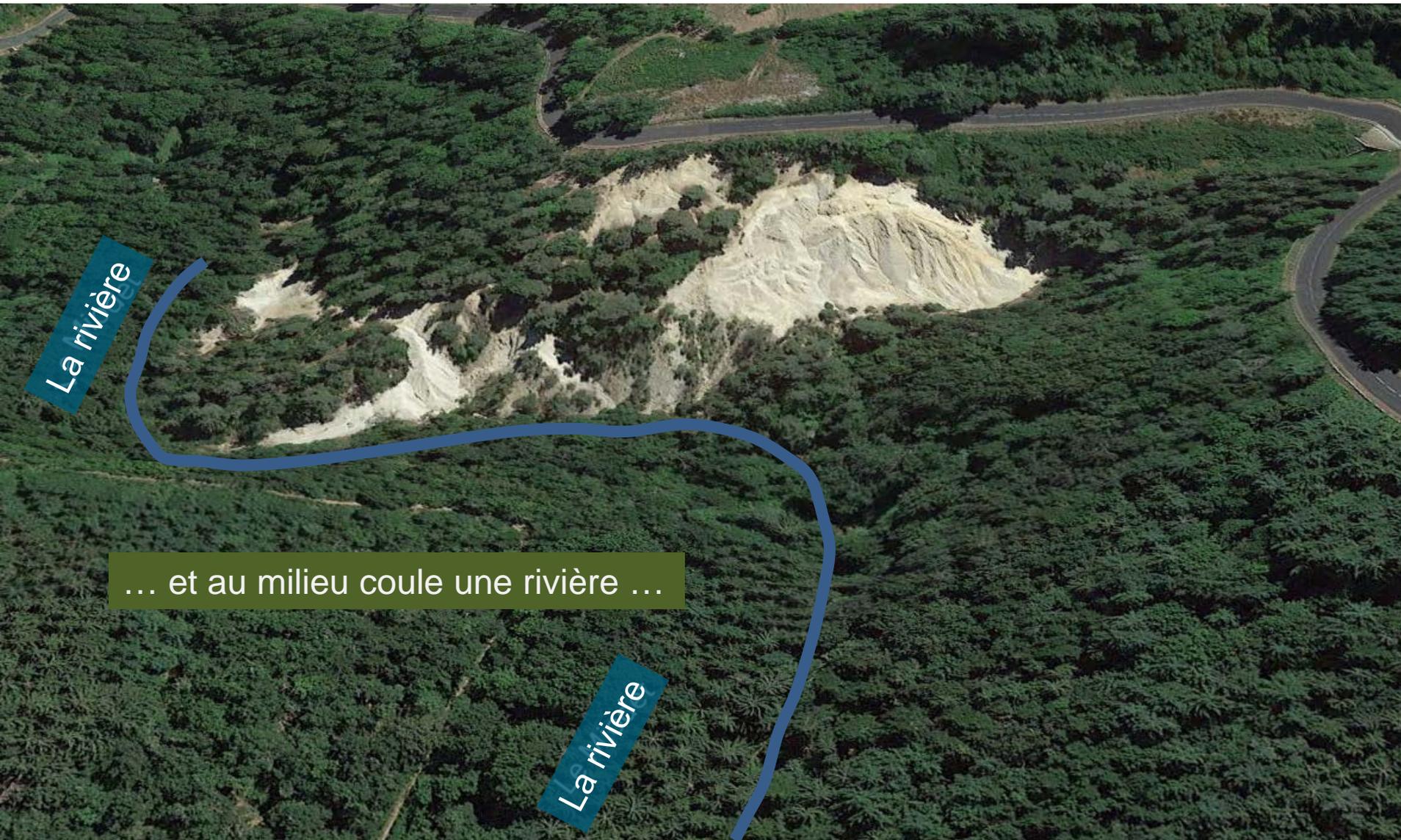
## REPRISE DE POLLUTION HISTORIQUE

- Exemple de concession octroyée par décret impérial du 26/06/1869. Arrêt de l'exploitation en 1901



## REPRISE DE POLLUTION HISTORIQUE

- Exemple de concession octroyée par décret impérial du 26/06/1869. Arrêt de l'exploitation en 1901

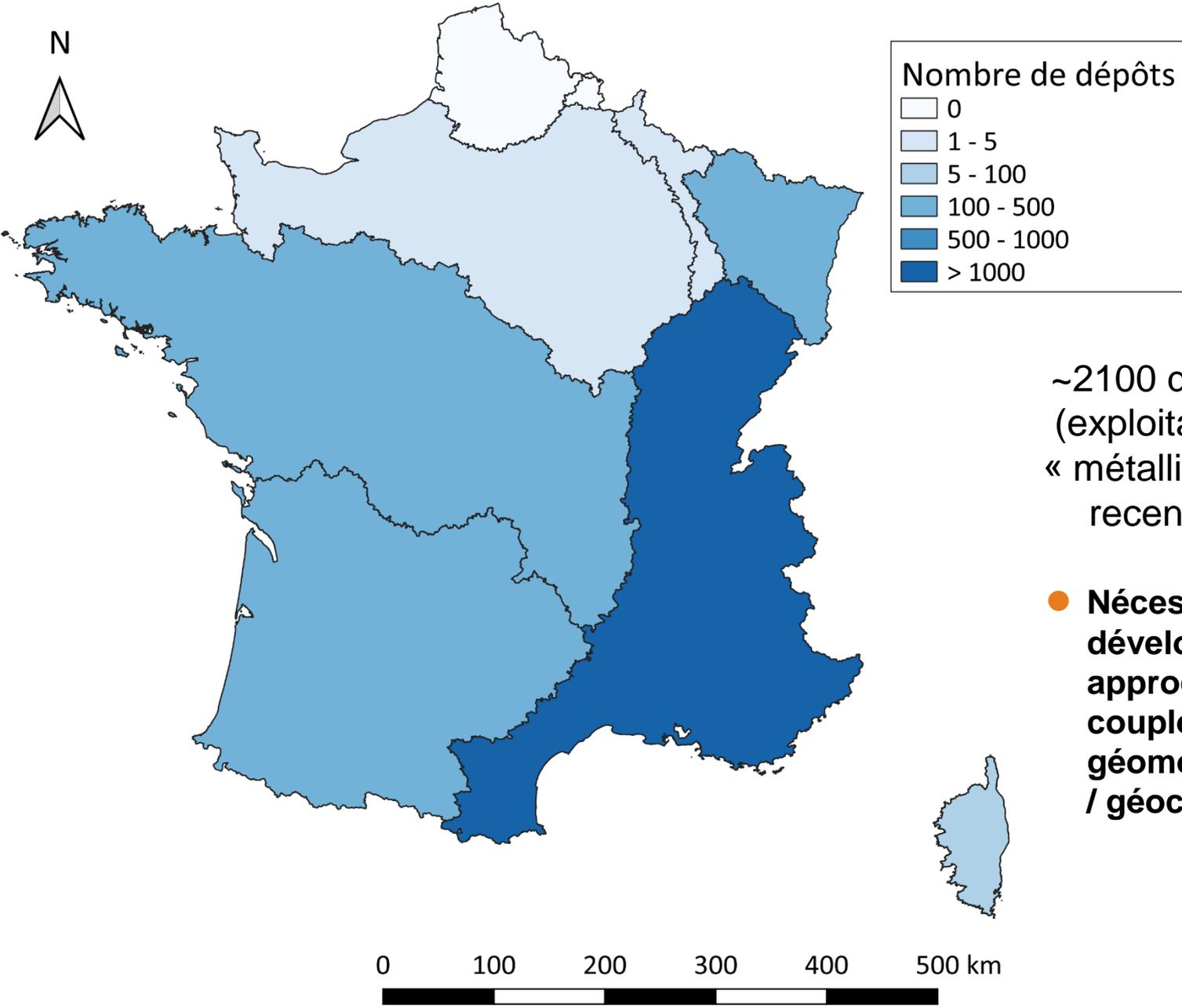


La rivière

... et au milieu coule une rivière ...

La rivière

# REPRISE DE POLLUTION HISTORIQUE



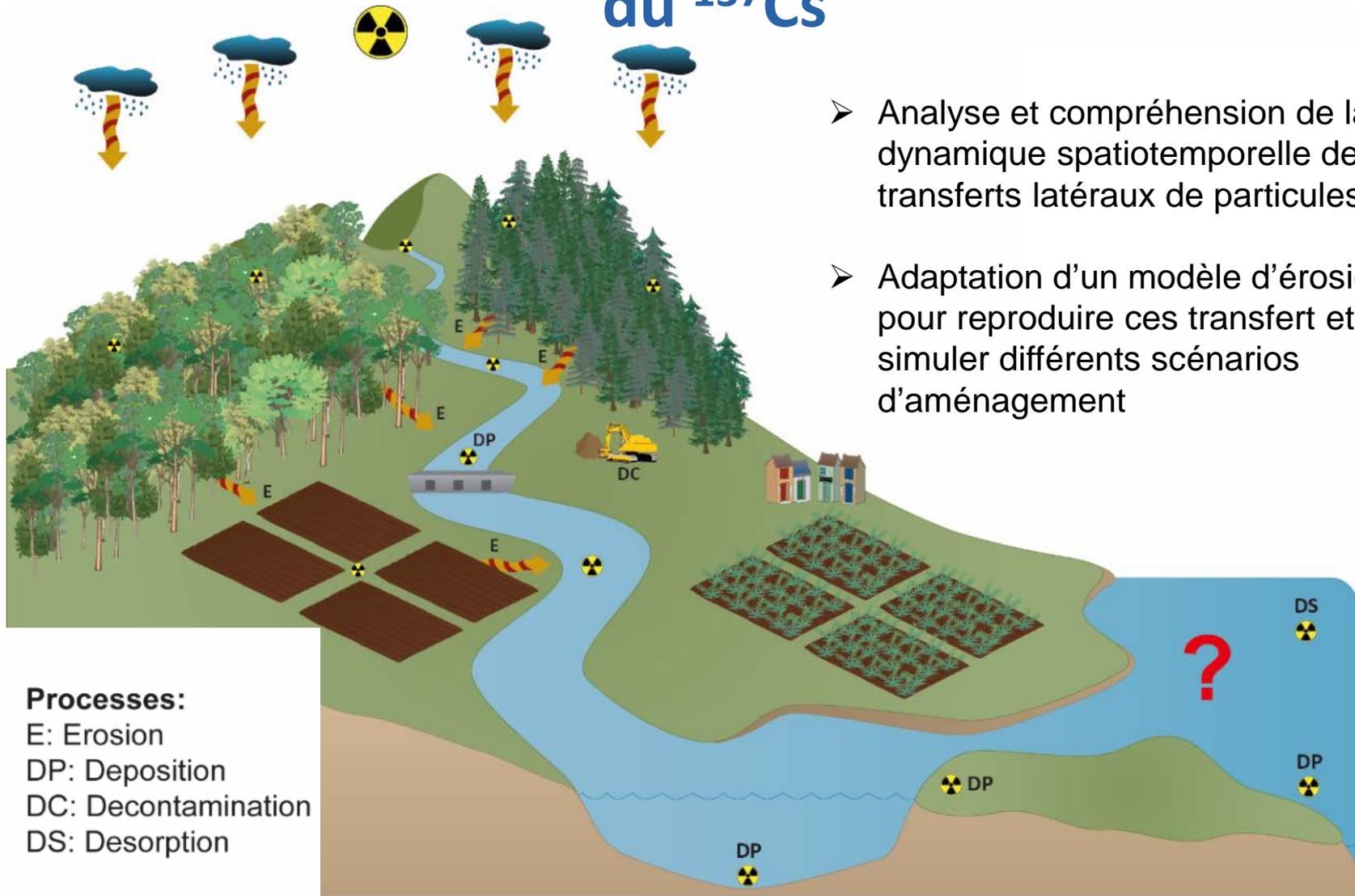
Nombre de dépôts	
□	0
□	1 - 5
□	5 - 100
□	100 - 500
□	500 - 1000
□	> 1000

~2100 dépôts  
(exploitations  
« métallique »)  
recensés

● **Nécessité de développer des approches couplées géomorphologie / géochimie**

# Traçage et modélisation du transfert post-accidentel

## du $^{137}\text{Cs}$



- Analyse et compréhension de la dynamique spatiotemporelle des transferts latéraux de particules
- Adaptation d'un modèle d'érosion pour reproduire ces transferts et simuler différents scénarios d'aménagement

### Processes:

E: Erosion

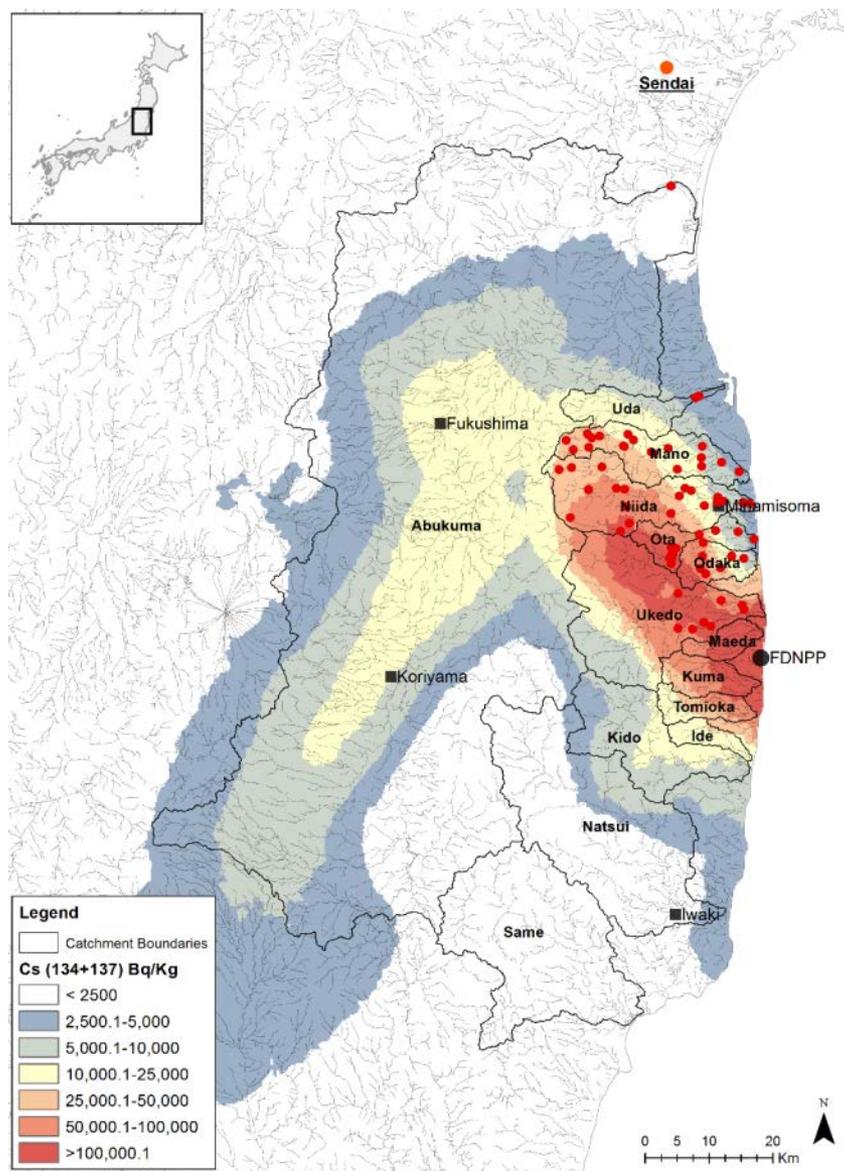
DP: Deposition

DC: Decontamination

DS: Desorption

*D'après Evrard et al. (2015)*

# Evolution des concentrations en $^{137}\text{Cs}$ dans les sédiments

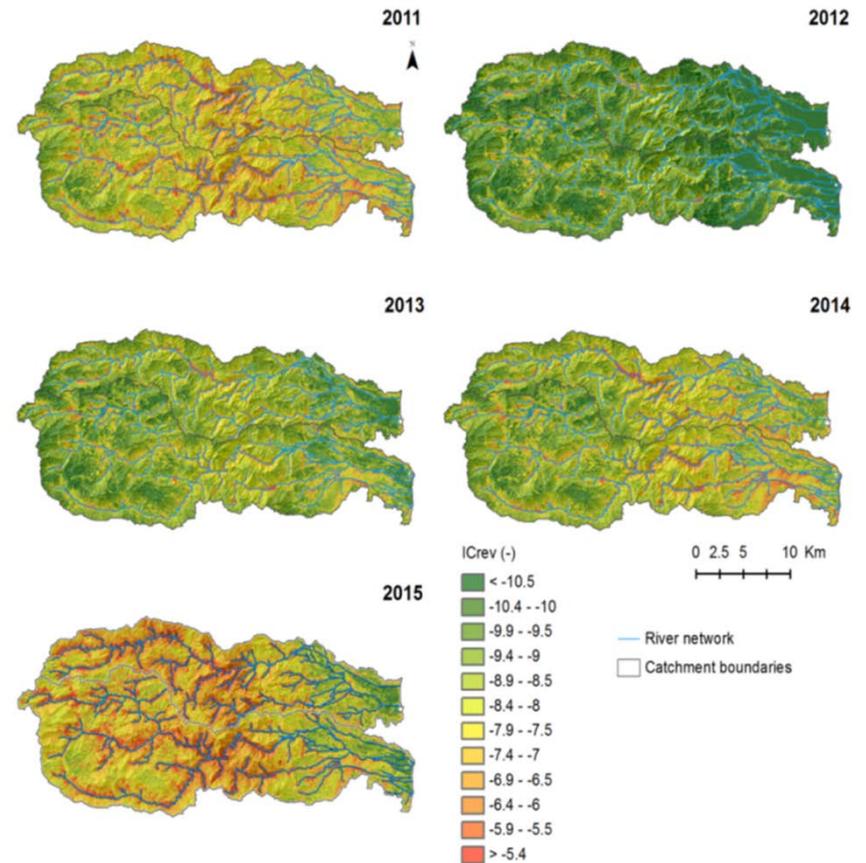
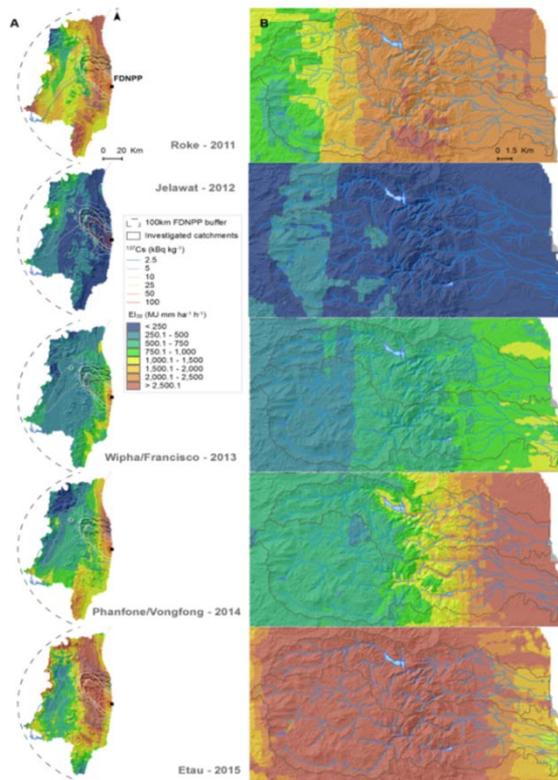


In the Fukushima Prefecture there is **2 times more rainfall** and **3-4 times more rainfall erosivity** than in the **Chernobyl region** (Lacey et al., 2016 HESS)

Rainfall driven soil erosion transfers radiocesium contaminated particles downstream.



**Typhoons** drive soil erosion  
 (rainfall erosivity - *below*)  
 resulting in increased  
**connectivity** (*left*).



Left rainfall erosivity for major typhoon events.  
 Above connectivity index for these typhoon  
 events from Chartin et al., (2017) EPJL

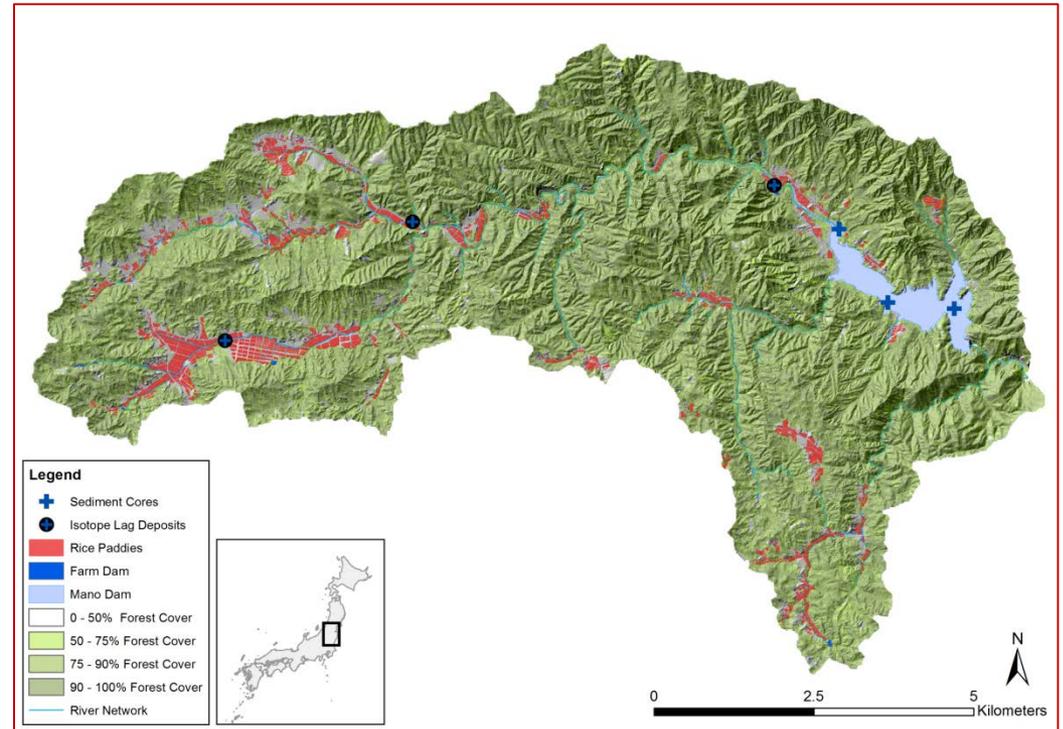


- **Sediment Sources in the Mano Dam:**

- **Forest sources** were modelled to contribute **27%** (SD 10%)

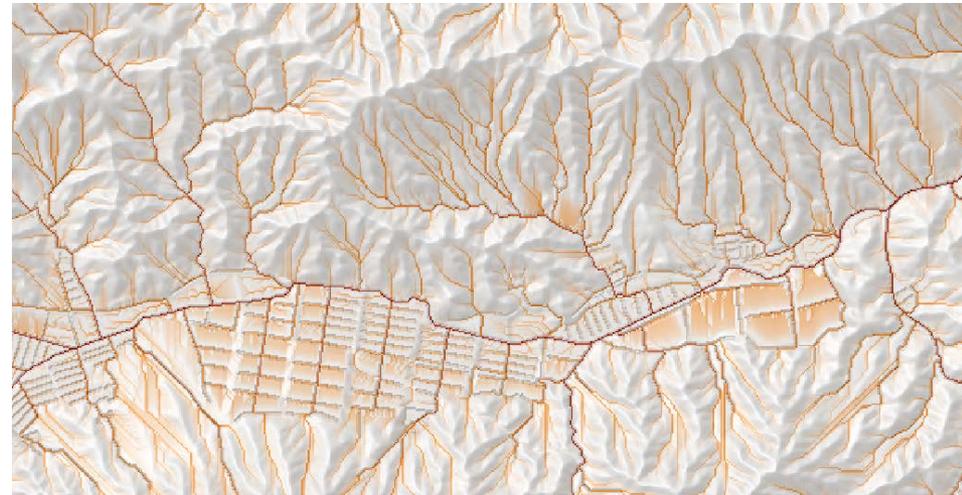
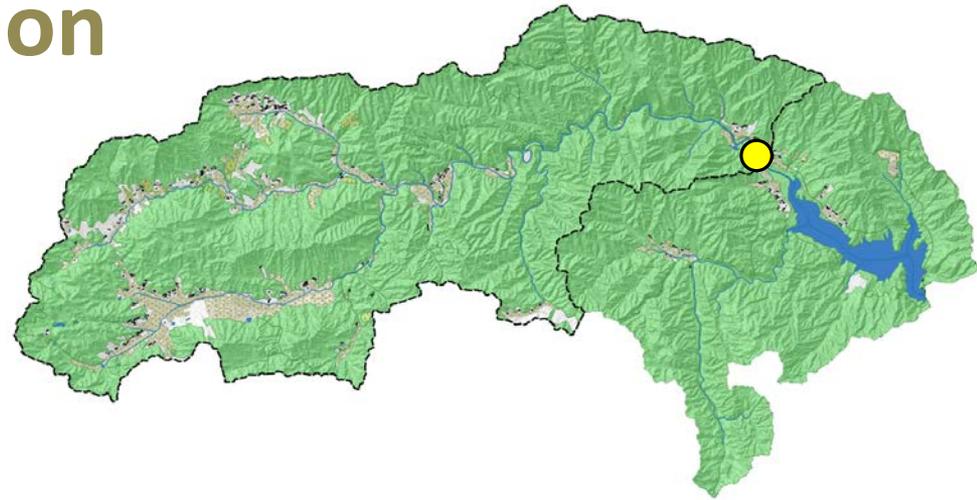
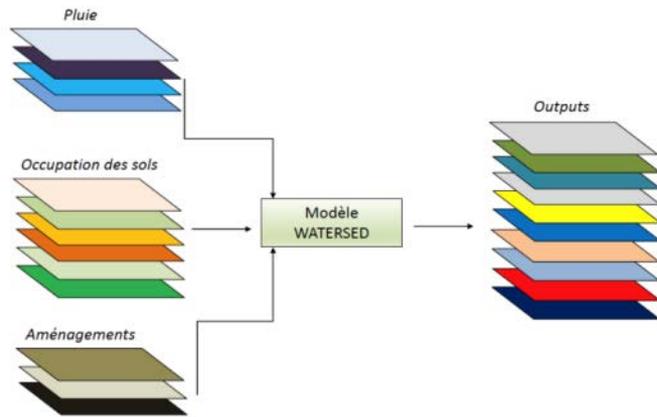
- **Cultivated sources** were modelled to contribute **48%** (SD 10%)

- **Subsoils** were modelled to contribute **26%** (SD 8%)



# Appui de la modélisation

Adaptation du modèle  
**WaterSed** en cours

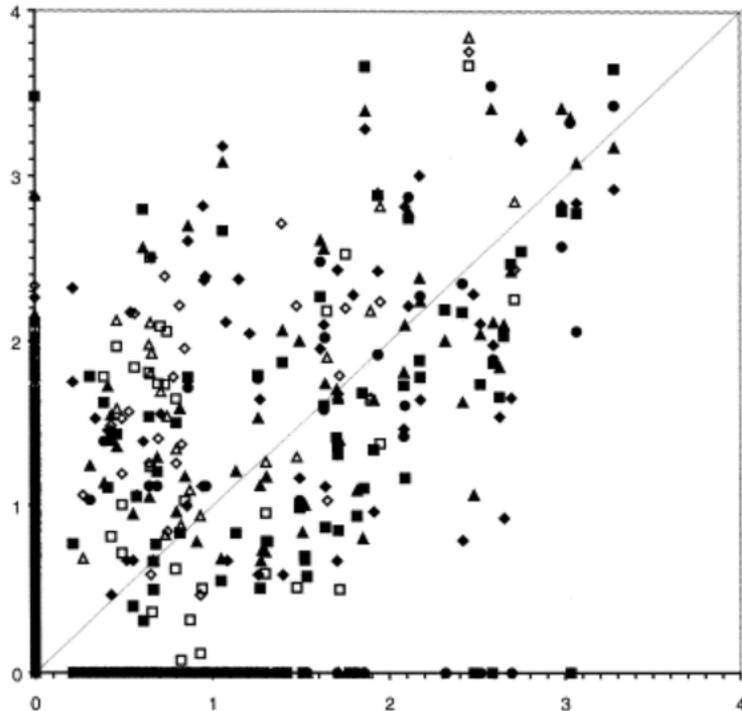


Développement du module de  
**radiocésium**

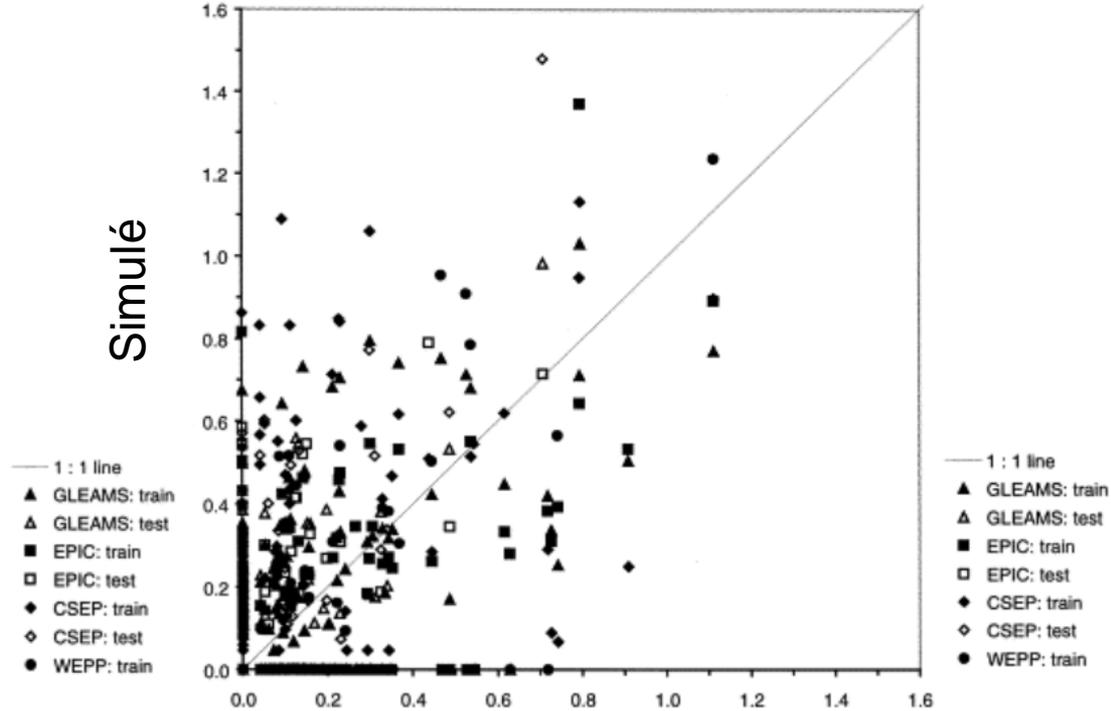
- **UN ENJEU MAJEUR POUR LA DURABILITÉ DE NOS SOCIÉTÉS**
- **D'UNE ÉROSION GÉOLOGIQUE À UNE ÉROSION ANTHROPIQUE**
- **COMPLEXITÉ DES PROCESSUS ET TRANSFERT D'ÉCHELLE**

# COMPLEXITÉ DES PROCESSUS

- Exercices d'évaluation : Application de 4 modèles « à l'aveugle »



Ruissellement



Observé

Erosion

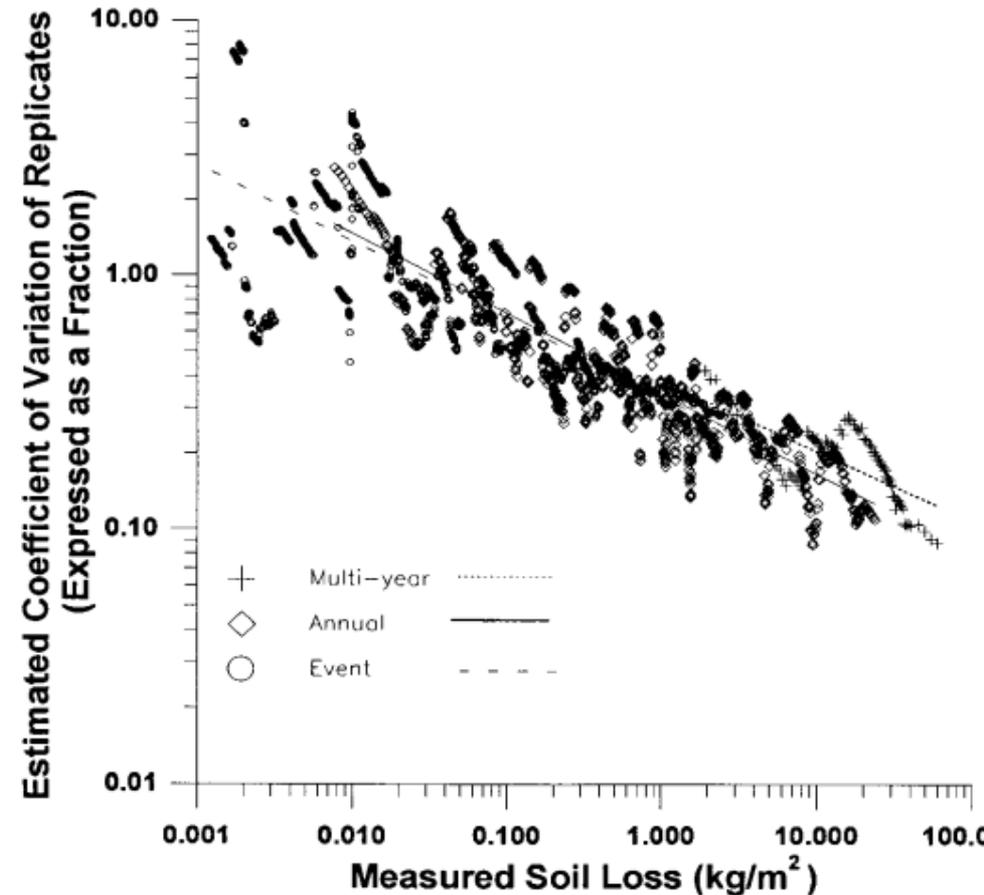
# COMPLEXITÉ DES PROCESSUS

- Diversité des paysages et des climats
  - Typhon/cyclone zones pentues
  - Saison humide en plaine
  - Garrigue/maquis en zone semi-aride
  
- Hétérogénéité spatiale
- Dynamique temporelle
  - Processus / échelle

Diversité au niveau des mesures à l'échelle très locale

...

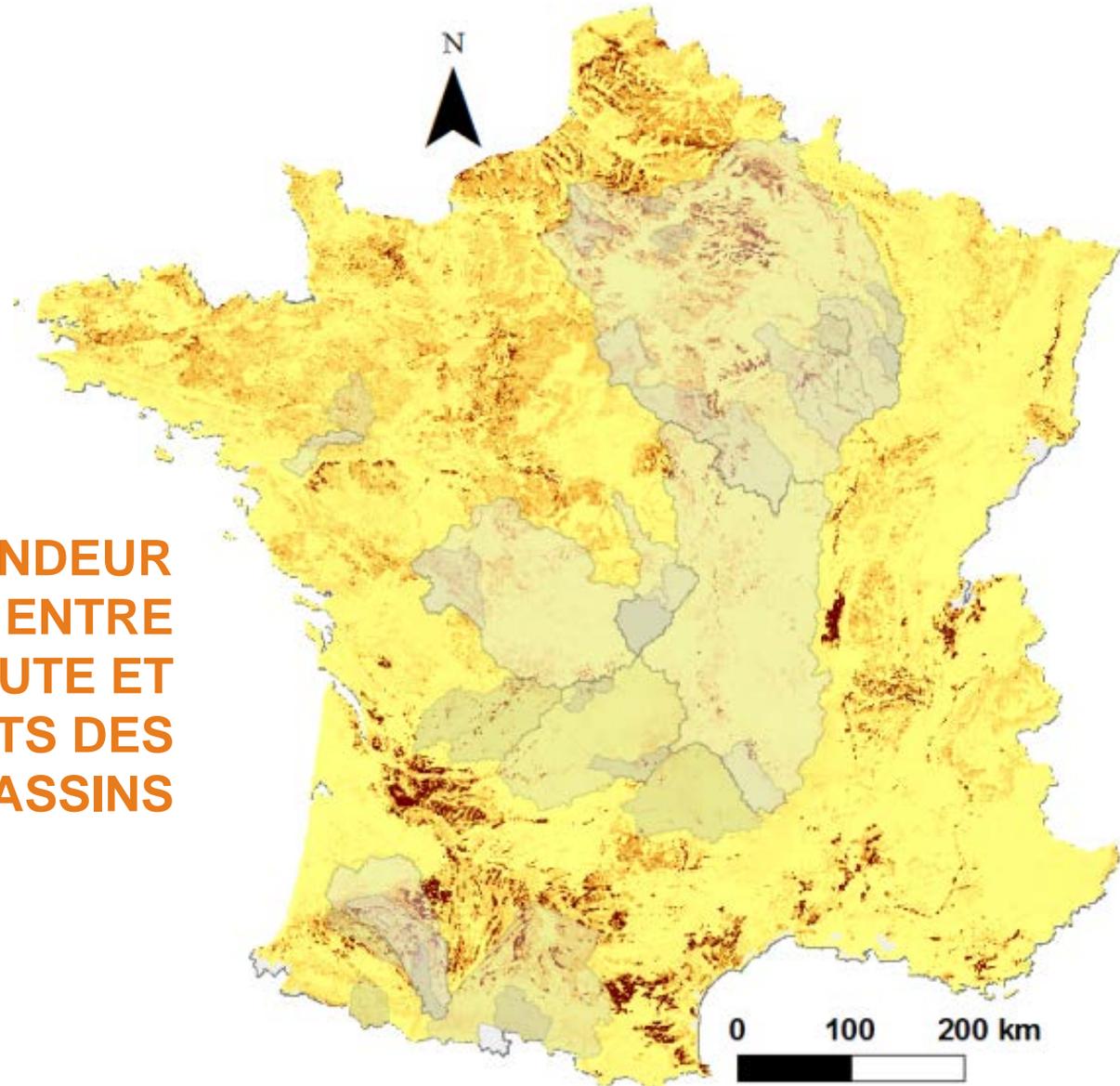
Nearing, Govers & Norton



# PROCESSUS / ECHELLE : LES BASSINS HYDROGRAPHIQUES

**EROSION BRUTE  
SUR LES VERSANTS  
~ 10<sup>0</sup> TON/HA/AN**

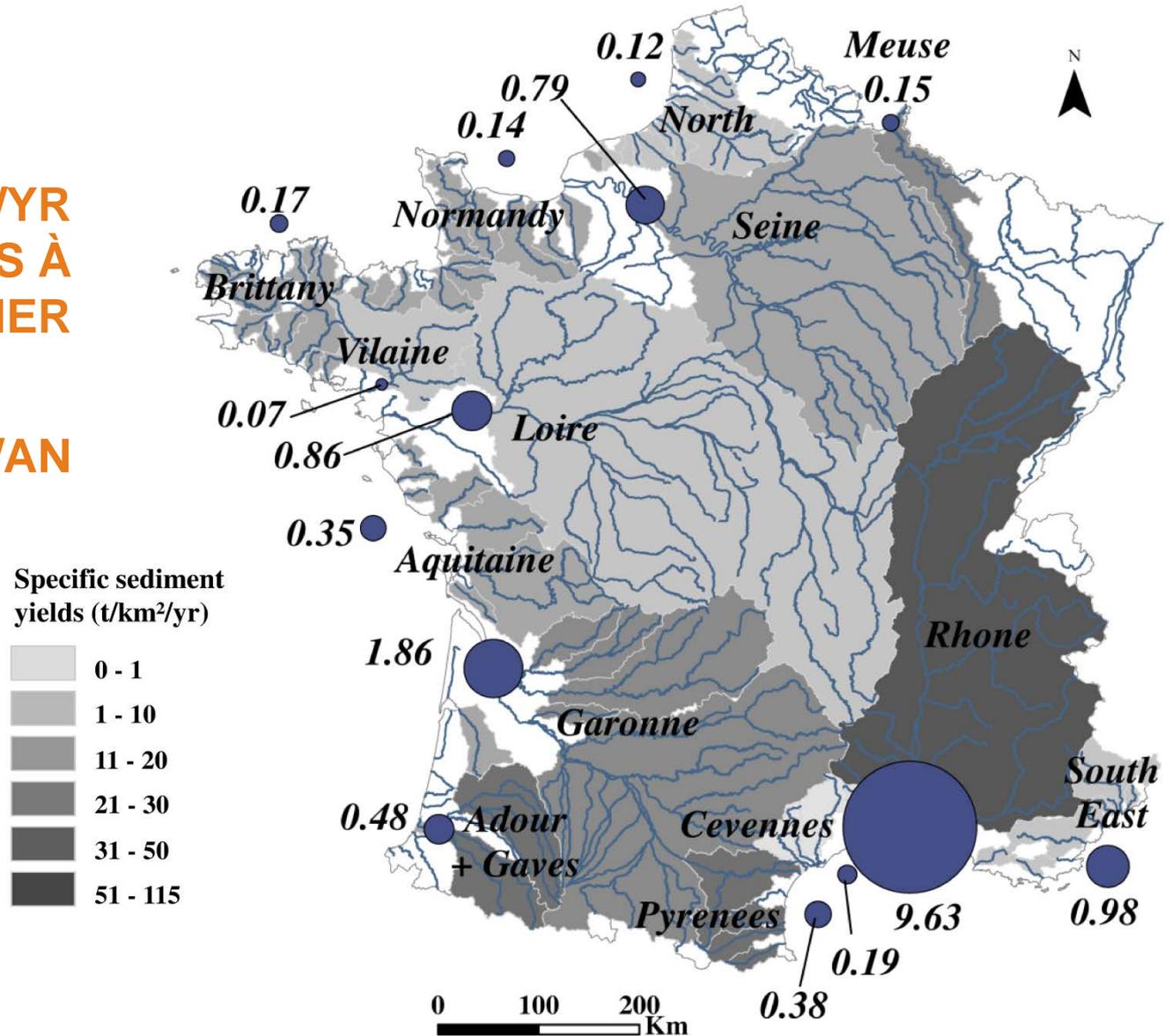
**1 ORDRE DE GRANDEUR  
DE DIFFERENCE ENTRE  
L'ÉROSION BRUTE ET  
LES EXPORTS DES  
BASSINS**



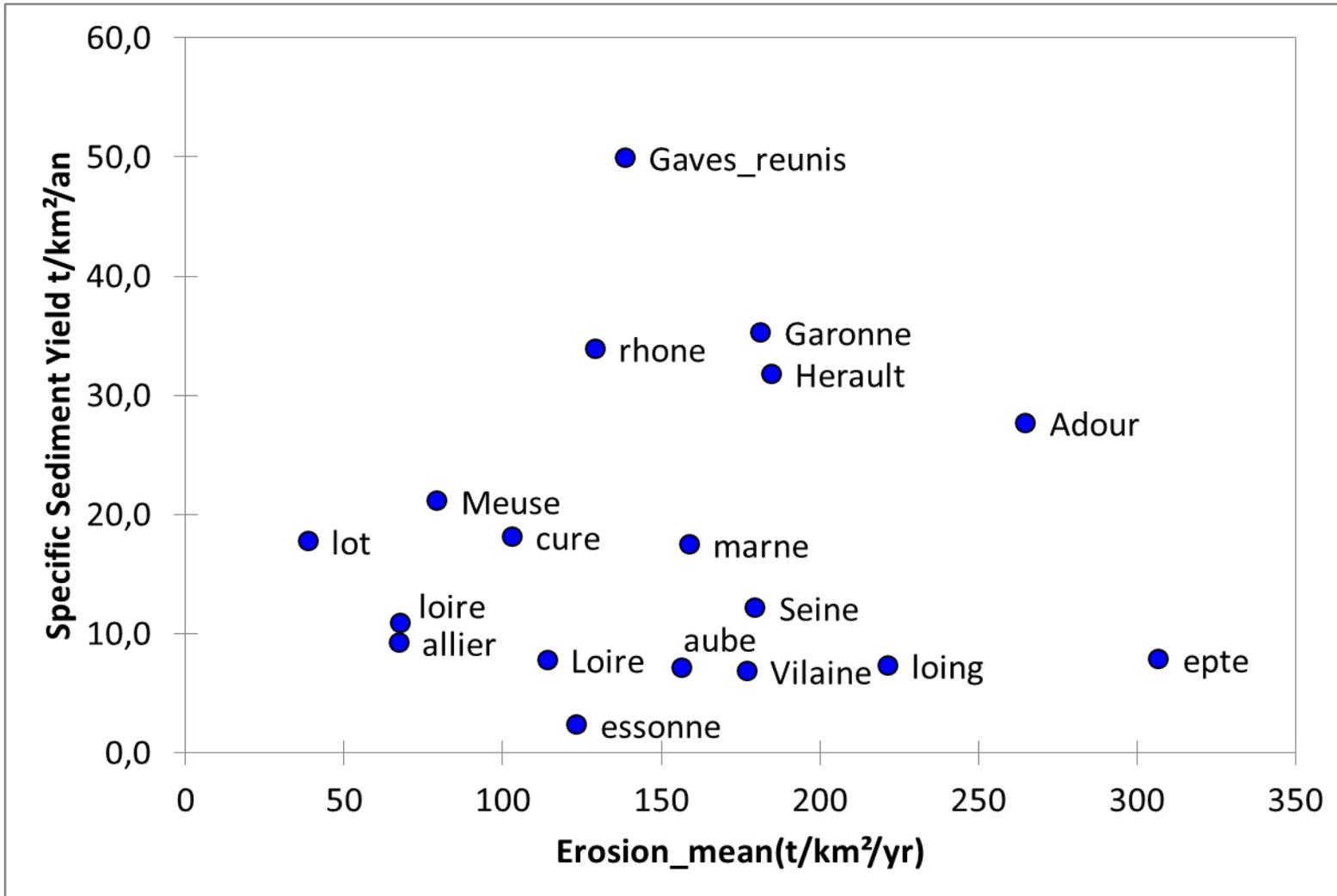
# PROCESSUS / ECHELLE : LES BASSINS HYDROGRAPHIQUES

16.2 MT/YR  
D'EXPORT DE MES À  
LA MER

~ 10<sup>-1</sup> TON/HA/AN

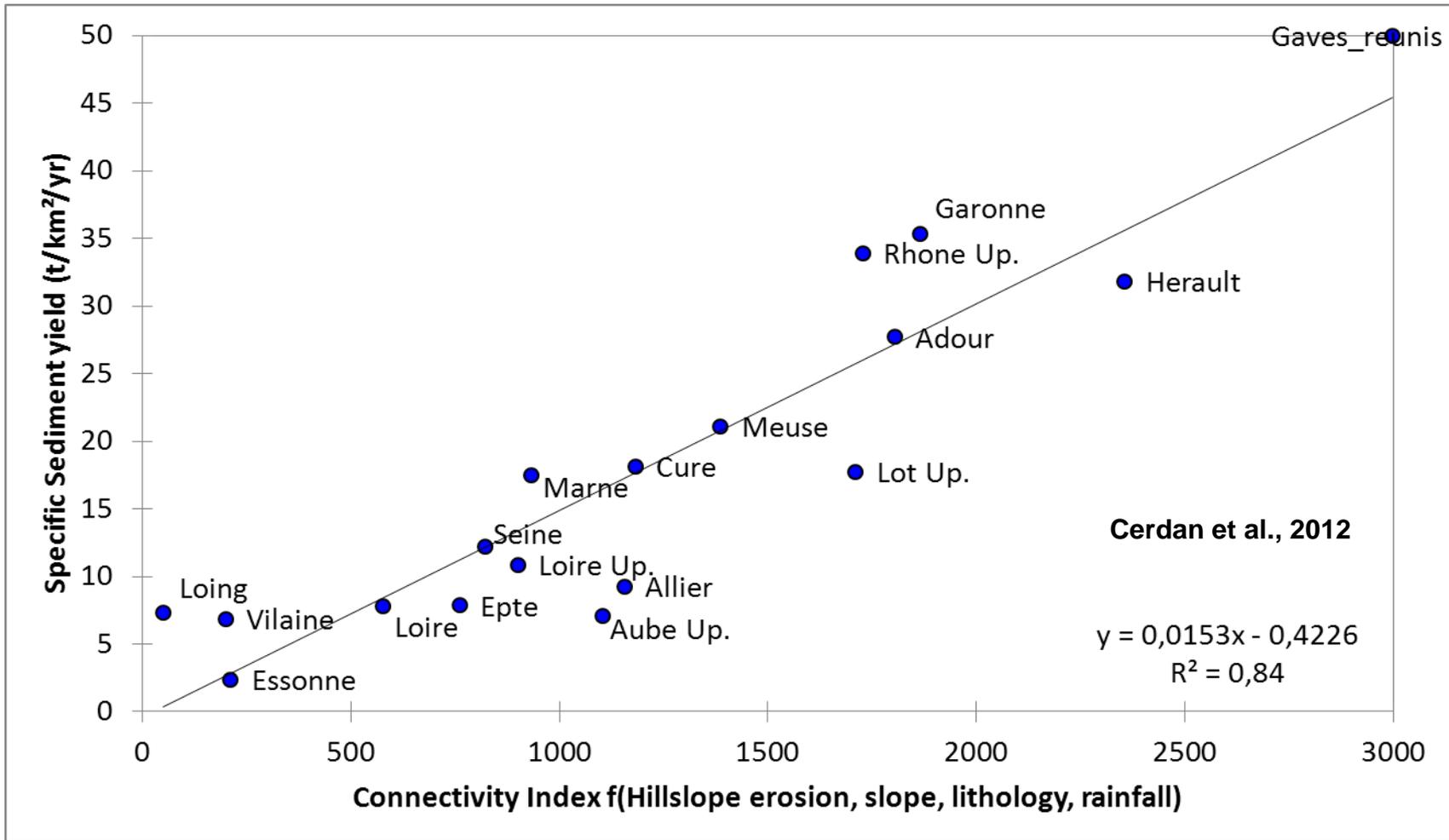


# SSL against Soil loss



# PROCESSUS / ECHELLE : LES BASSINS HYDROGRAPHIQUES

## CONNECTIVITÉ DES VERSANTS À LA RIVIÈRE

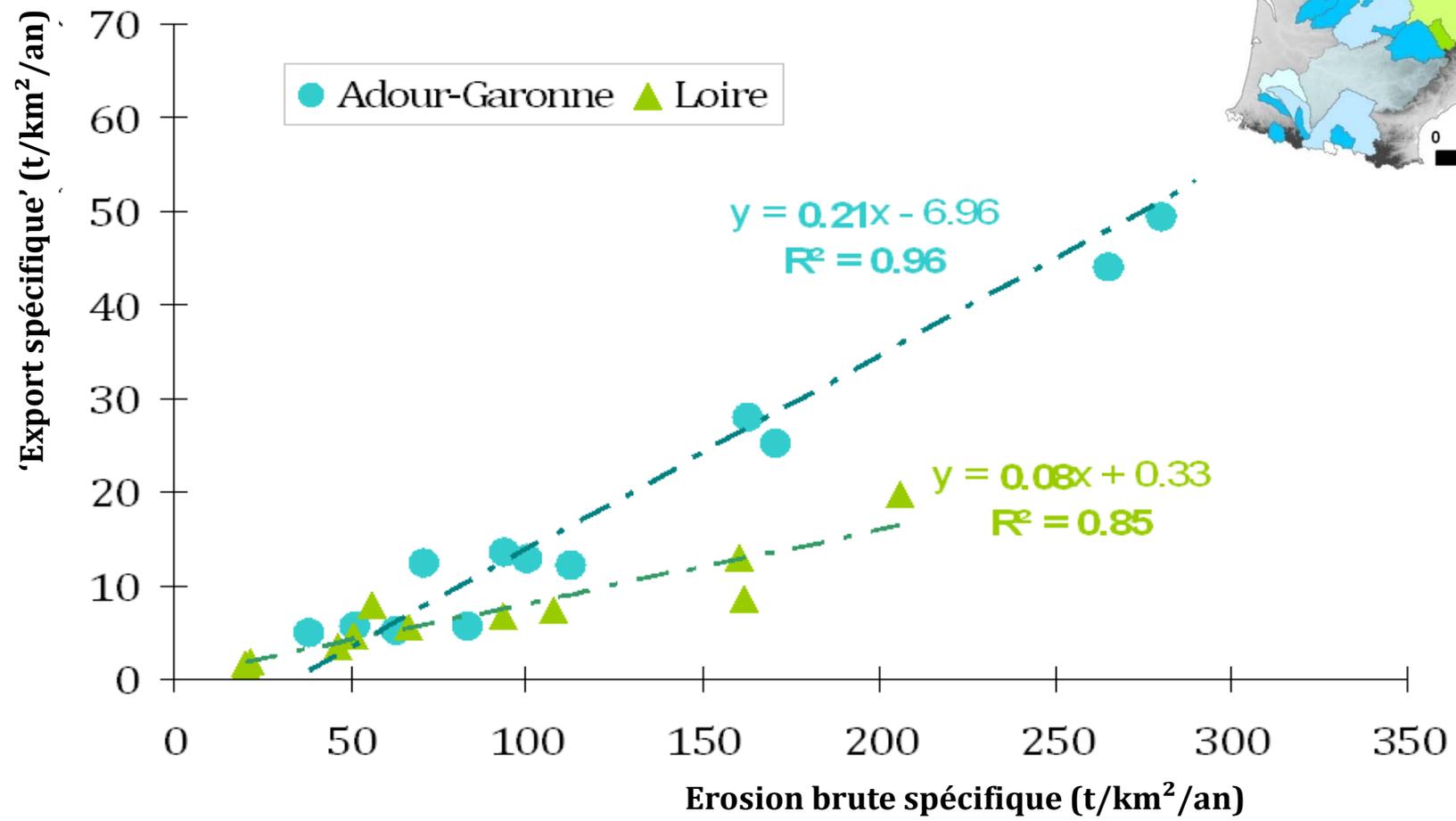
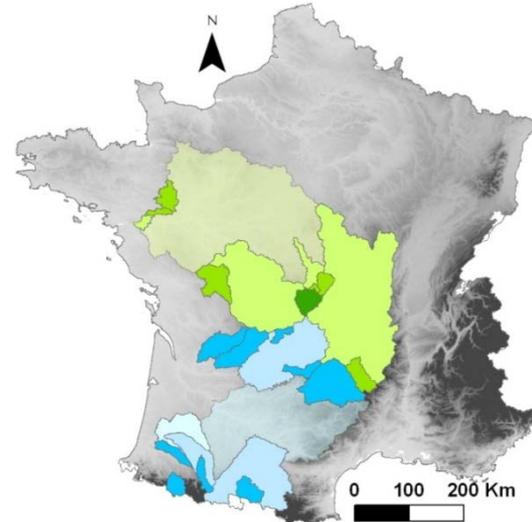


Cerdan et al., 2012

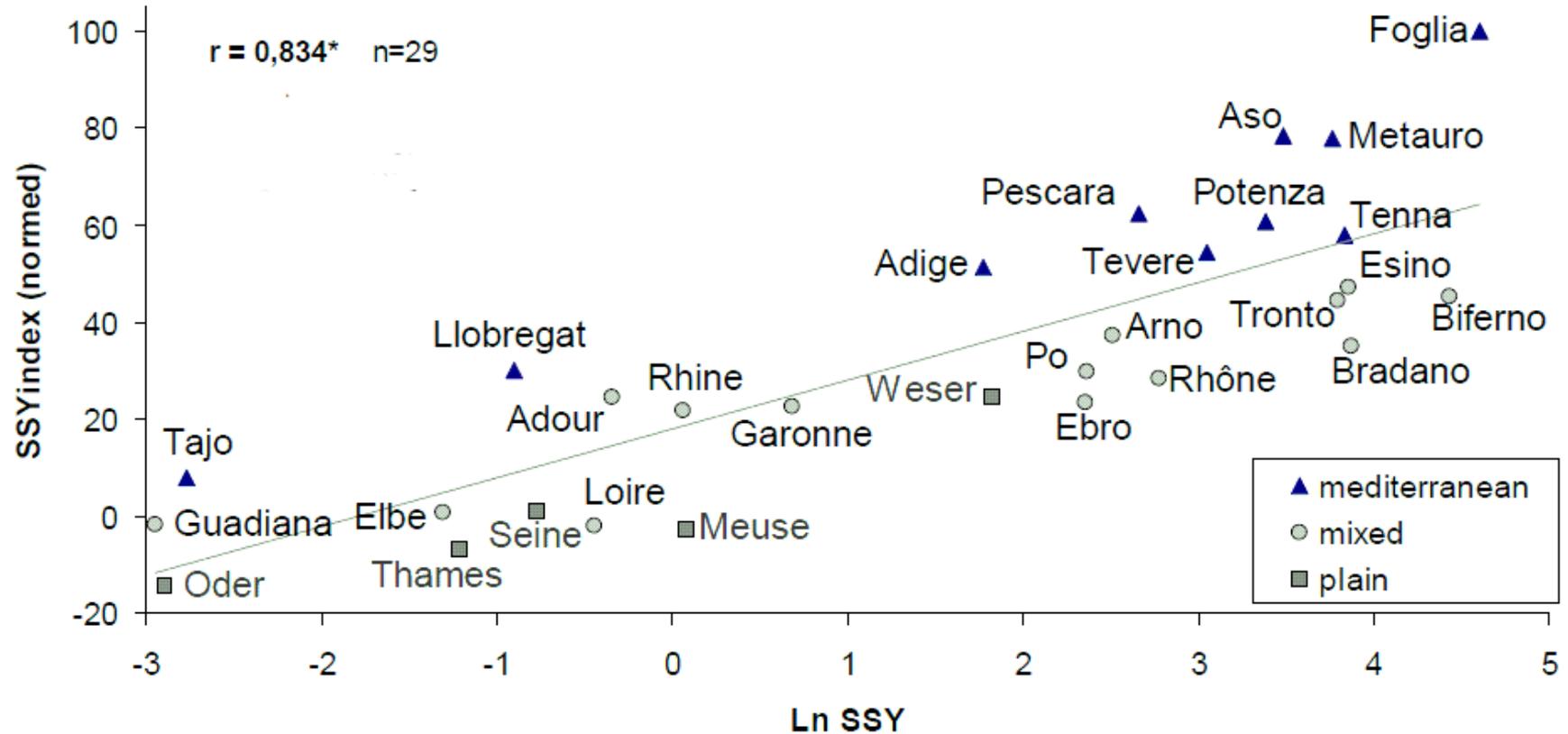
$y = 0,0153x - 0,4226$   
 $R^2 = 0,84$

# PROCESSUS / ECHELLE : LES BASSINS HYDROGRAPHIQUES

CETTE DIFFERENCE N'EST PAS ALÉATOIRE...



## CONNECTIVITÉ DES VERSANTS À LA RIVIÈRE



# LES MESSAGES

- **Une érosion historique qui a fragilisé les écosystèmes « finis »**
- **Accélération du phénomène après la deuxième guerre mondiale**
  - Principalement dans les systèmes en culture intensive
  - Efficacité technique théorique des systèmes de conservation des sols
  - Abandonnement des terres - Sécurité alimentaire
  - Perte de la réserve de biodiversité des sols
- **Diminution des exports à la mer**
- **De très gros enjeux sur la qualité des milieux récepteur**
  - Eutrophisation (marée verte...)
  - Export polluant (radionucléide, métaux lourds, HAP, métalloïdes, médicaments, ...)
  - Captage eau souterraine, Lagons, ...
  - Envasement masses d'eaux et rivières, dégradation habitat écologique
  - Inondation par ruissellement
- **Des enjeux émergents en termes de Services écosystémiques, Cycle du carbone, Recharge des nappes**

