

# GÉOMORPHOLOGIE

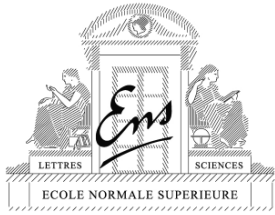
γη : Terre    μορφή : Forme    λόγος : Discours (Étude)

**Science de la forme des paysages**



*Comparison between the heights of Mt. Everest on the Earth, Maxwell Montes on Venus and Olympus Mons*

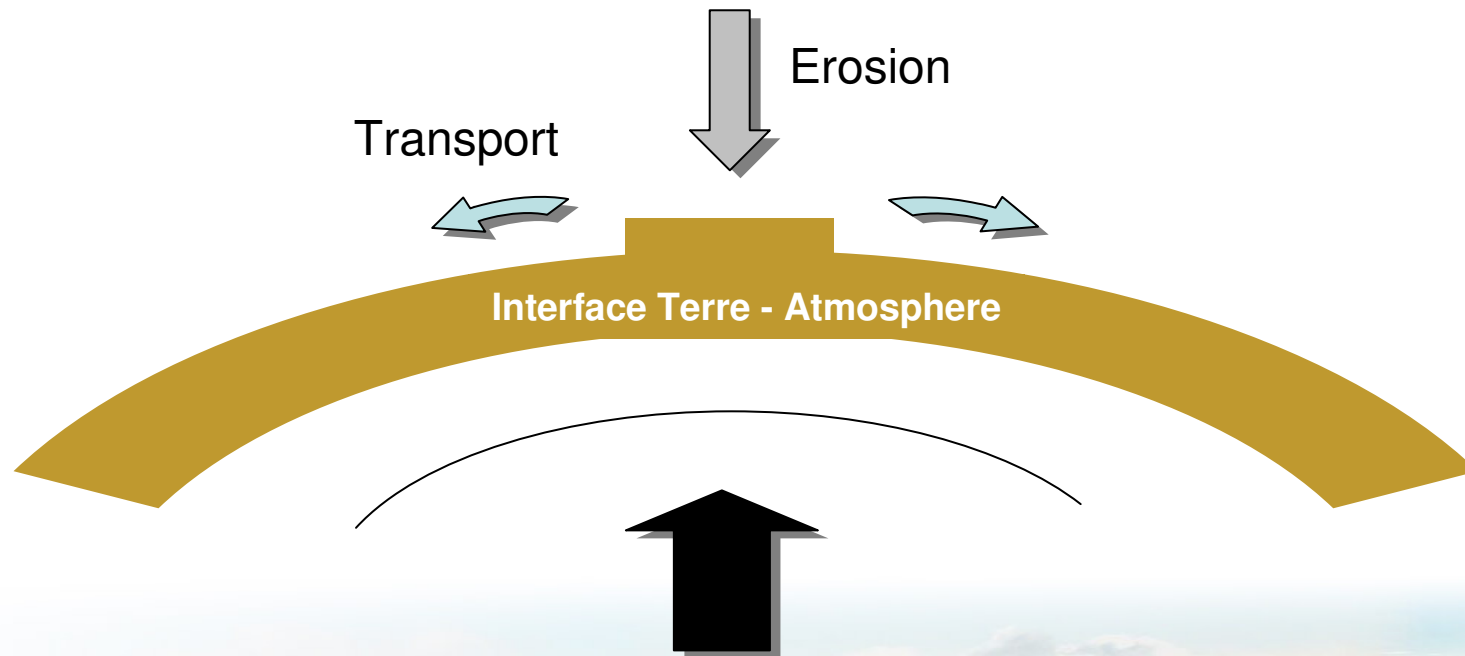




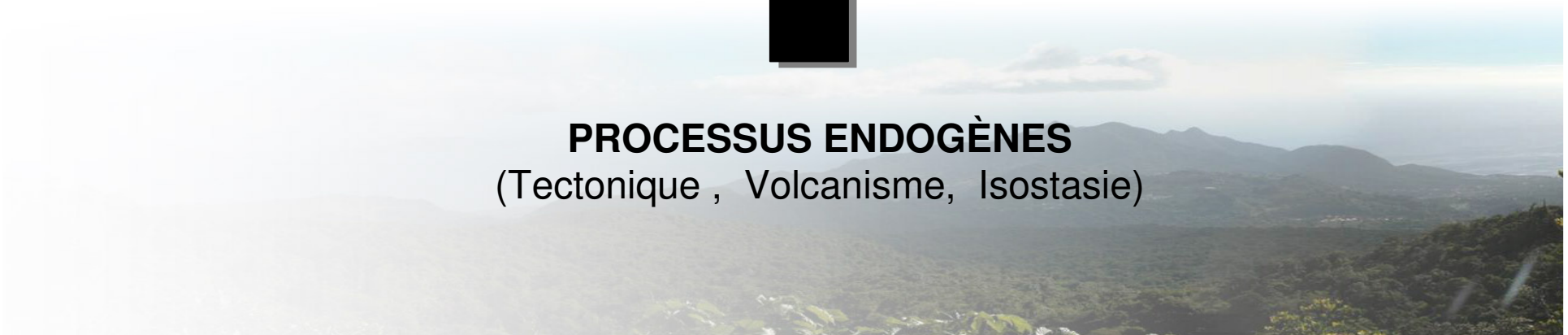
# Interface

## PROCESSUS EXOGÈNES

(Climat, Activité biologique)



**PROCESSUS ENDOGÈNES**  
(Tectonique , Volcanisme, Isostasie)





# Reliefs tectoniques

Interface Terre - Atmosphere

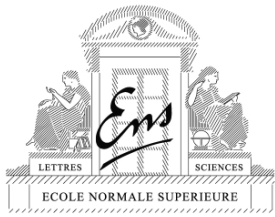


*Gobi Altai (Mongolie)*



*San Andreas*





# Reliefs volcaniques

Interface Terre - Atmosphere



*Maly Semiachik (kamtchatka)*



*Ankisabe (Madagascar)*



# Reliefs côtiers

Interface Terre - Atmosphere

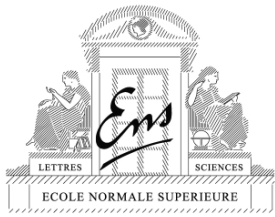


*Moorea (Polynésie française)*



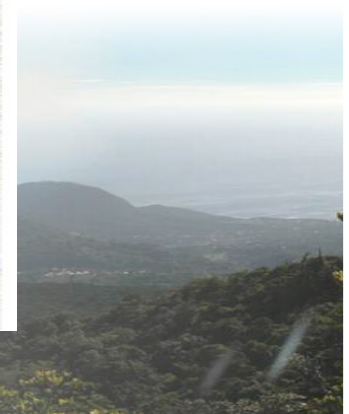
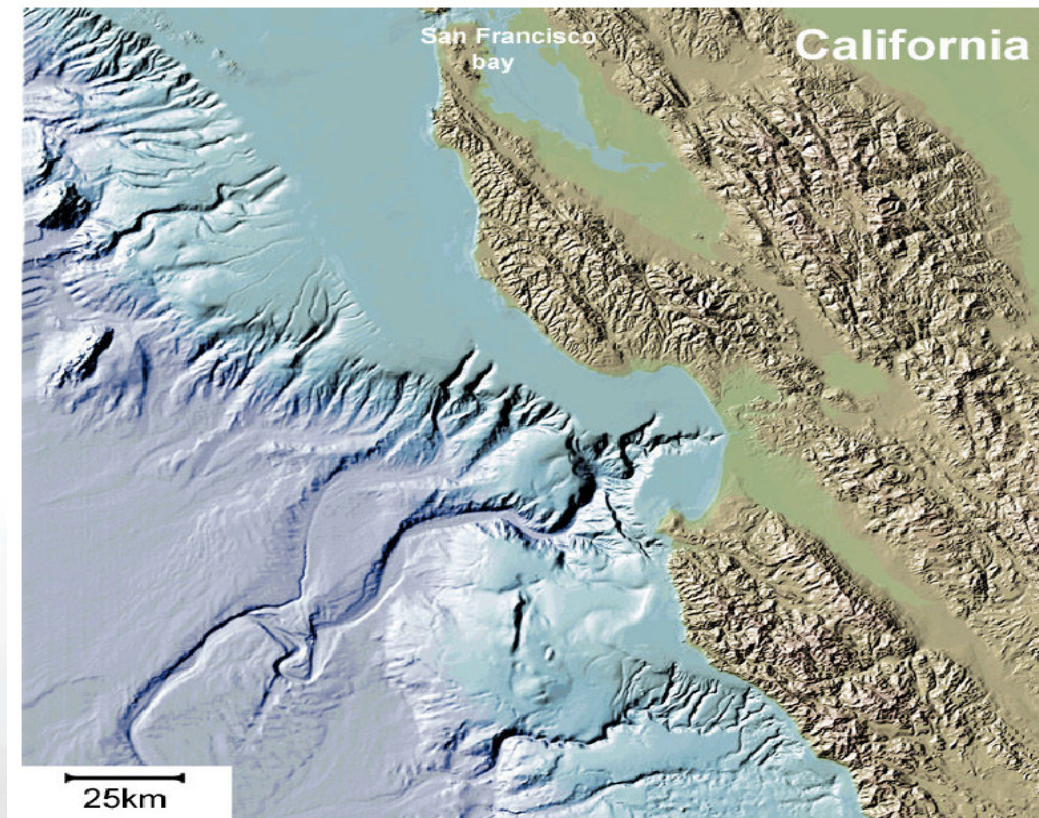
*Japon*





# Reliefs sous-marins

Interface Terre - Atmosphere





# Reliefs glaciaires

Interface Terre - Atmosphère



*Franz Josef Glacier (Nouvelle Zélande)*



*Glacier noir (écrins)*

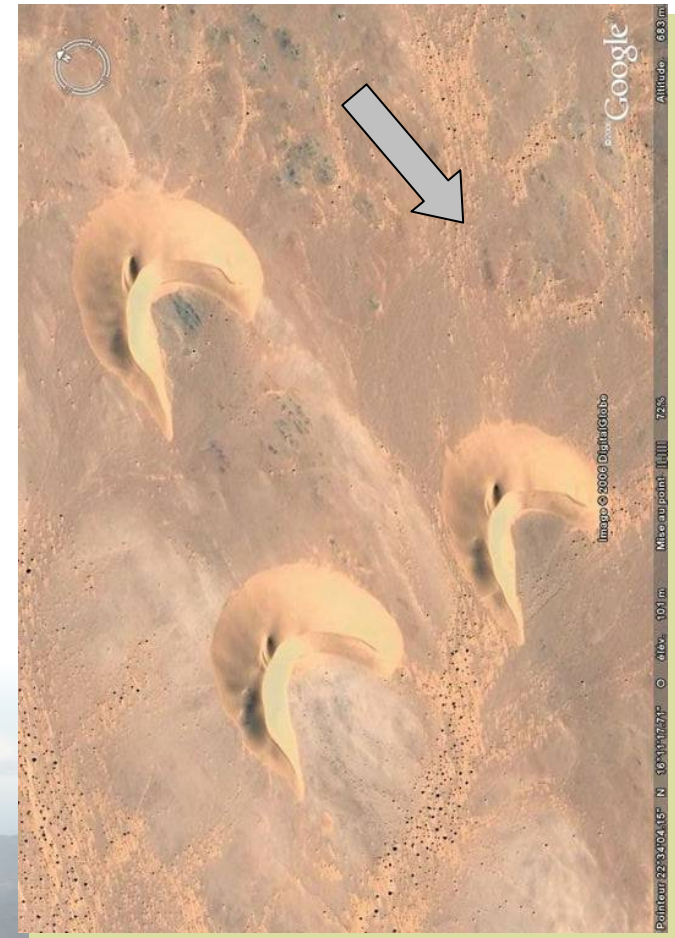


## Reliefs arides

Interface Terre - Atmosphere

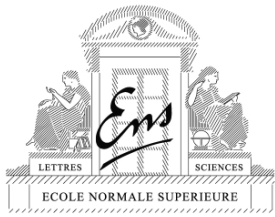


*Sahara occidentale*



*Sahara occidentale*





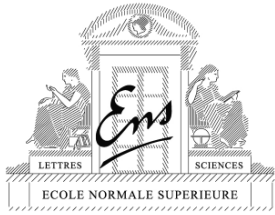
# Reliefs karstiques

Interface Terre - Atmosphere



*La Loue (Jura)*





# Objectif de la géomorphologie

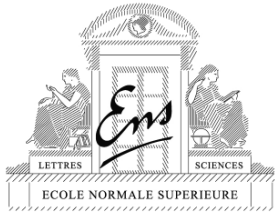
De la forme des objets qui composent le paysage

La nature des processus qui agissent sur ces objets  
afin de les rendre tels

i.e. Forçage tectonique, érosion, transport, forçage biologique...







STRATIGRAPHIE

SEDIMENTOLOGIE

PETROLOGIE

PHYSIQUE

BIOLOGIE

# GÉOMORPHOLOGIE

CLIMATOLOGIE

GEOCHIMIE

TECTONIQUE

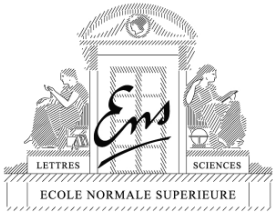
METEOROLOGIE

PEDOLOGIE

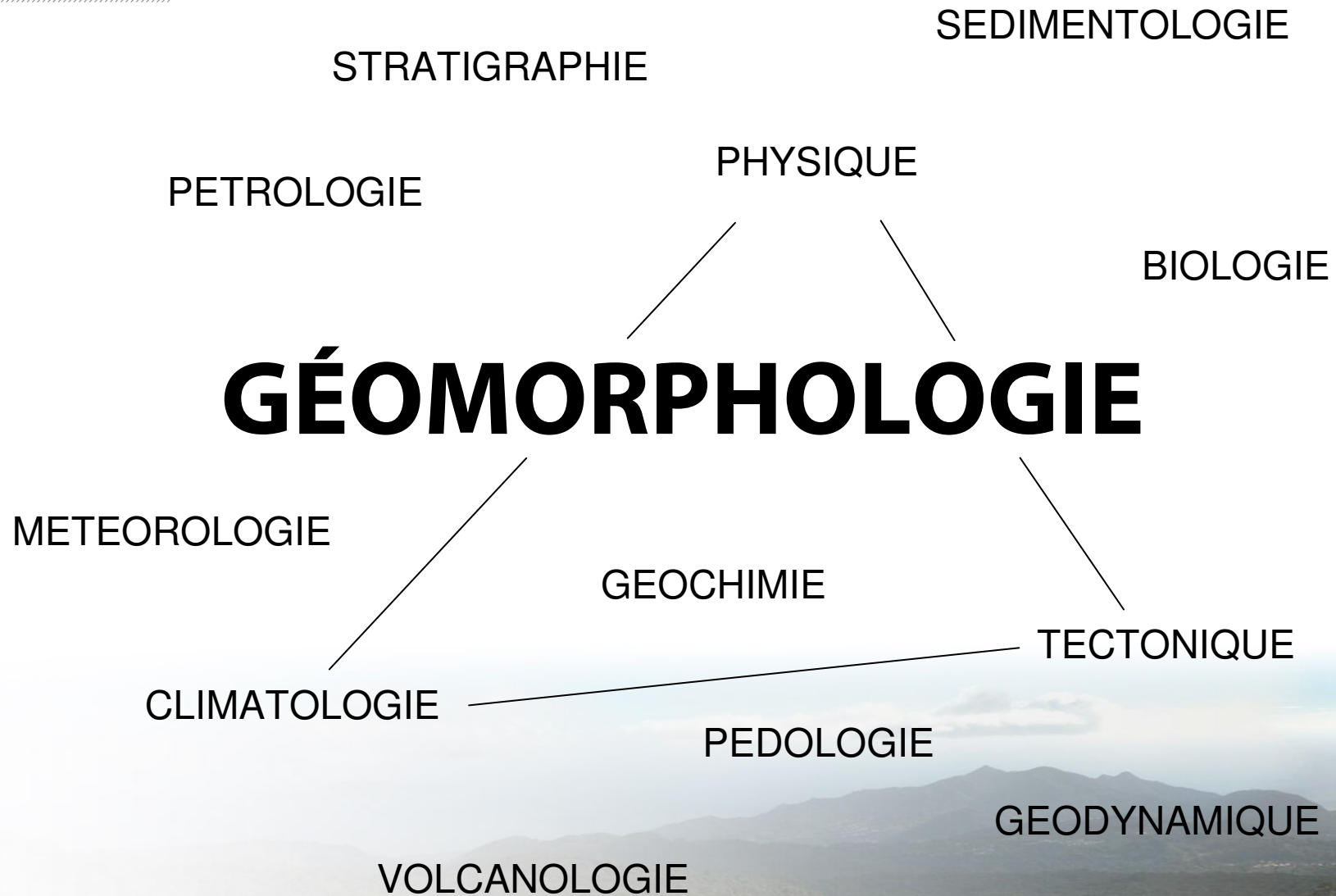
GEODYNAMIQUE

VOLCANOLOGIE

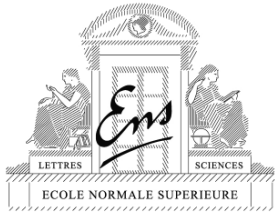




# GÉOMORPHOLOGIE







## Plan du cours

### 1 Introduction

### 2 Loi d'érosion à grande échelle (Ma)

Le Bassin versant

Loi de Anhert

### 3 Méso-échelle (1-10ka)

Profils de rivières

Points d'inflexion

### 4 Processus d'érosion à l'échelle de transport (actuelle)

#### 4.1 Processus de pentes

Solifluxion

Reptation

Écoulements gravitaires

Conditions de rupture

Déclencheurs

Écoulements

#### 4.2 Processus fluviaux

Hydrodynamique fluviale

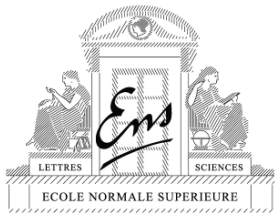
Transport de sédiments

Formes et types de rivières

### 5 Datations quaternaires

Isotopes cosmogéniques





## Petite histoire de la discipline

Aux 17<sup>ème</sup>-18<sup>ème</sup> siècle, le paradigme dominant était le **Catastrophisme**. Tous les objets naturels (vivants ou non) résultaient d'événements brusques et relativement récents.

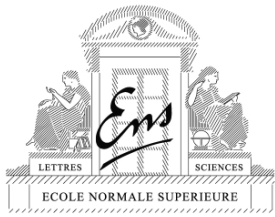
Compatible avec les écritures saintes.

Age de la terre ~10-100 ma

**Georges Cuvier, 1768-1832**







## Petite histoire de la discipline

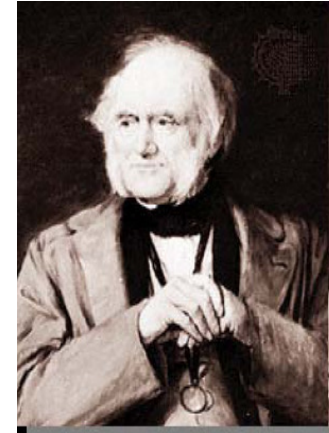
Puis vinrent les **unifomitaristes**



**James Hutton** 1726-1797



**John Playfair** 1748-1819

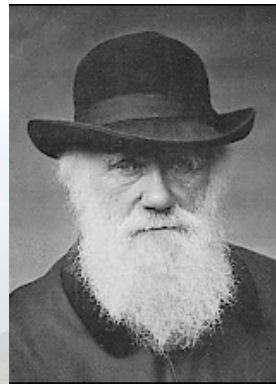


**Sir Charles Lyell** 1797-1875

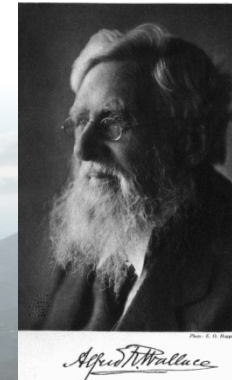
Suivis de près par les **évolutionnistes**



**Jean-Baptiste de Lamarck** 1744-1829



**Charles Darwin** 1809-1882



**Alfred R. Wallace** 1823-1913

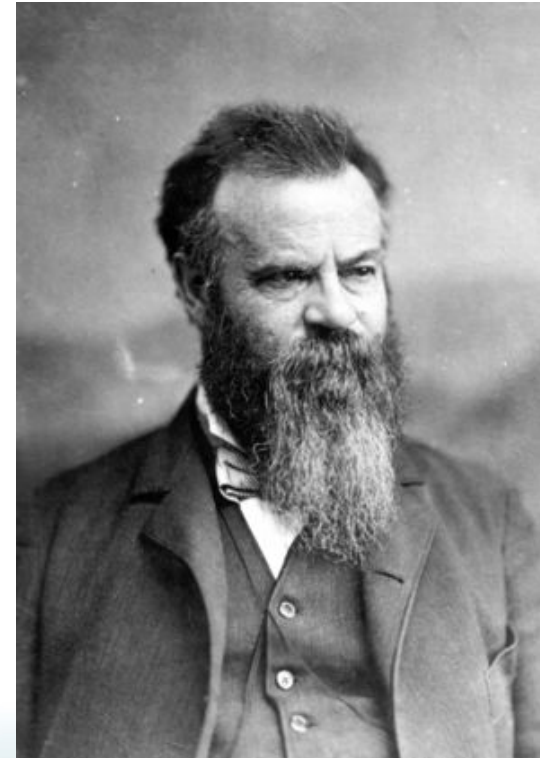


## Petite histoire de la discipline

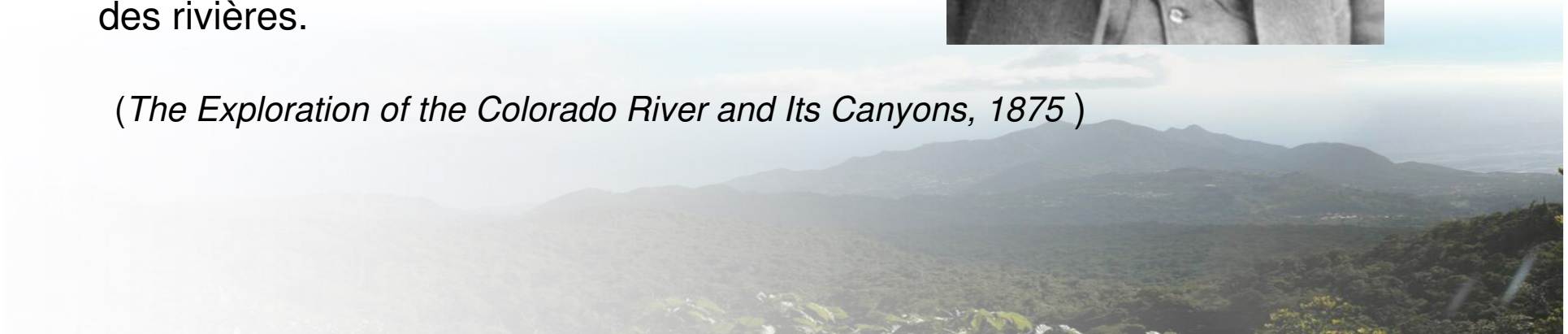
**John Wesley Powell (1834–1902)**

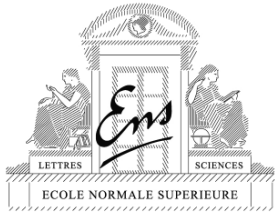
**Expéditions du grand canyon du Colorado (1869-1871)**

- “...that the river preceded the canyons and then down cut as the plateau rose”
- Classification des vallées et basins versants.
- Définition du niveau de base (base level) des rivières.



*(The Exploration of the Colorado River and Its Canyons, 1875 )*





## Petite histoire de la discipline

### Grove Karl Gilbert (1843-1918)

“...all streams work toward a graded condition, a state of dynamic equilibrium that is attained when the net effect of the flowing water is neither erosion of the bed nor deposition of sediment, when the landscape reflects a balance between the resistance of the rocks to erosion and the processes that are operative upon them.”

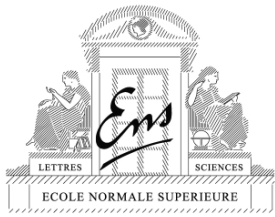
**Gilbert, G.K.**, *Report on the geology of the Henry mountain*, Geographical and Geological Survey of the Rocky Mountain Region (U.S.), Clarence Edward Dutton, 1877.



**Idée d'un équilibre des systèmes érosionnels**







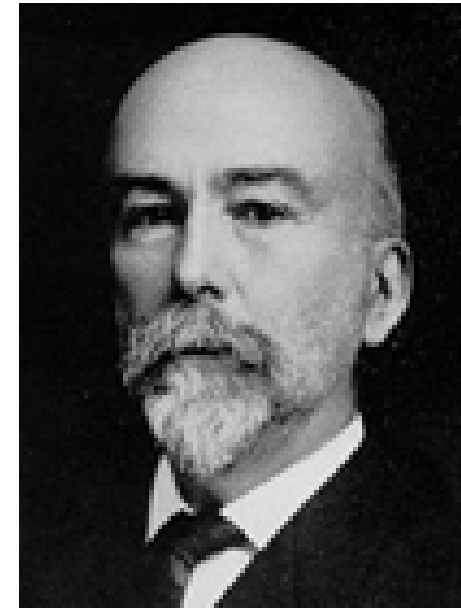
## Petite histoire de la discipline

Oui mais en fait non...

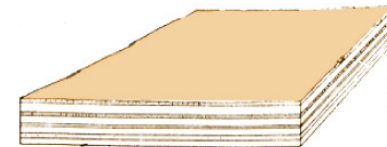
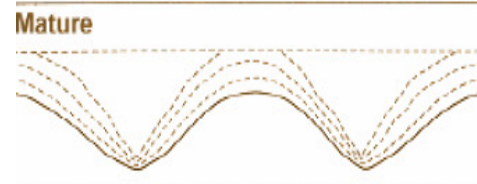
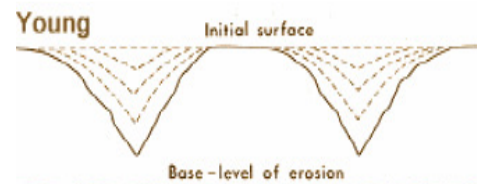
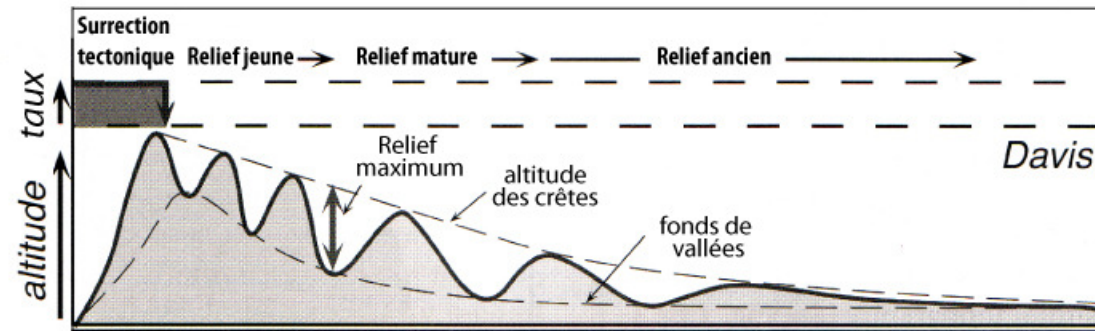
**William Morris Davis** (1850-1934)

### Étrange modèle du Cycle d'érosion

- La création des reliefs est rapide et courte au regard du temps nécessaire à leur érosion
- Mélange de Darwinisme (spéciation brusque) et de catastrophisme.

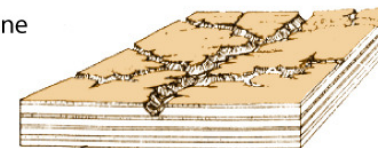


# Petite histoire de la discipline

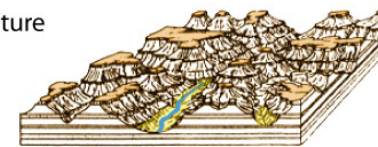


↑  
Surrection tectonique

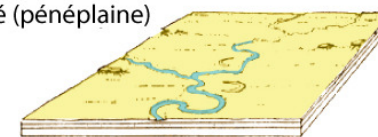
Relief jeune



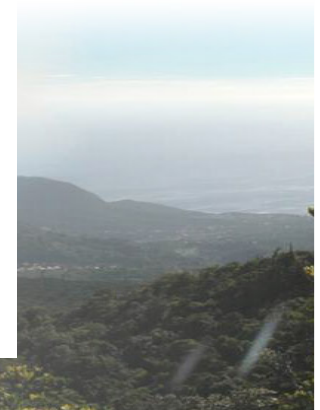
Relief mature



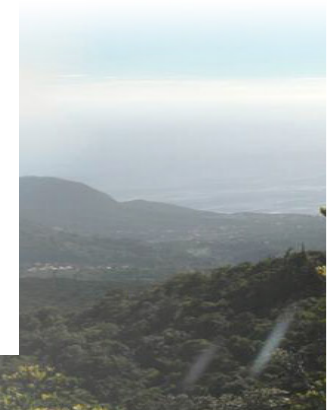
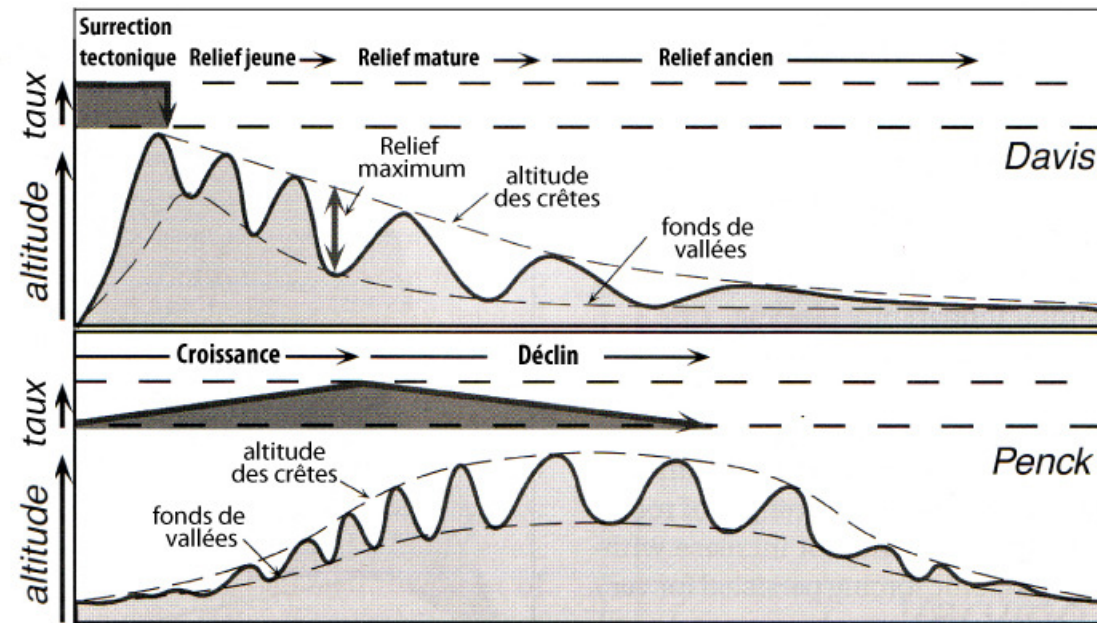
Relief âgé (pénéplaine)



↓  
Réponse érosive

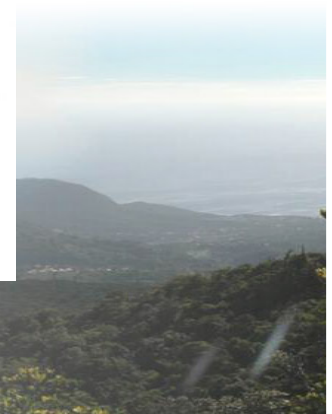
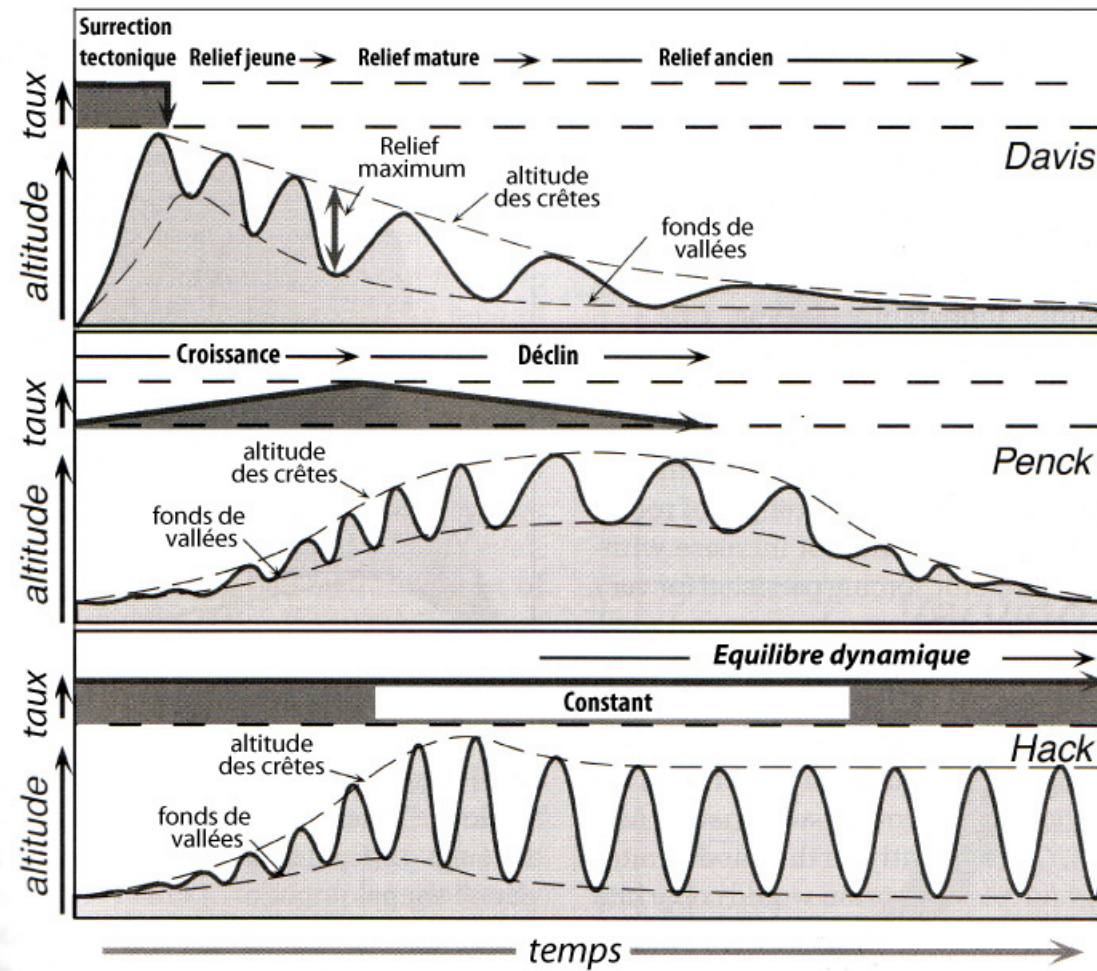


# Petite histoire de la discipline

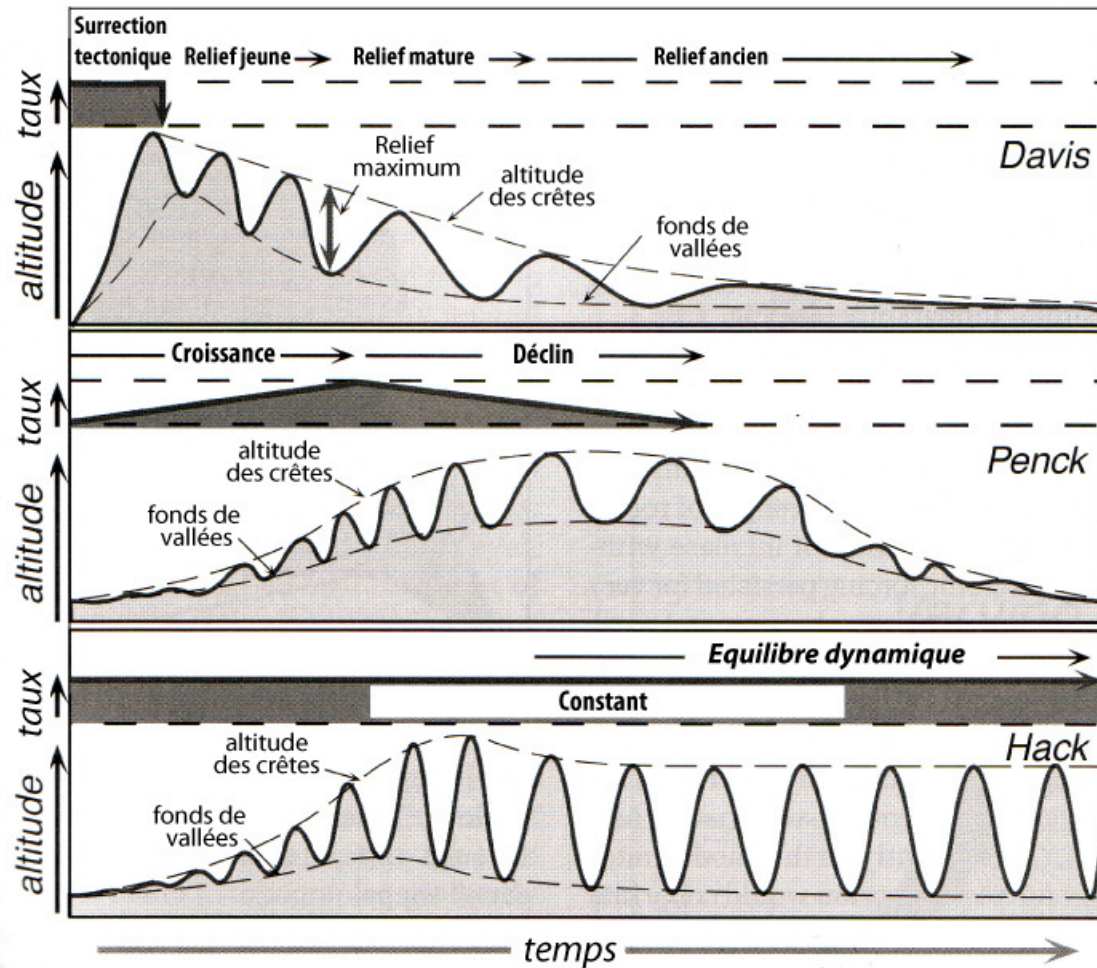
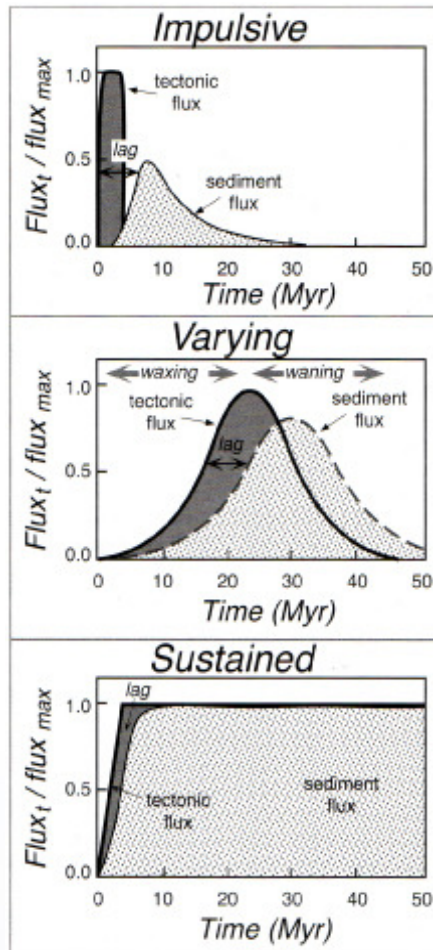




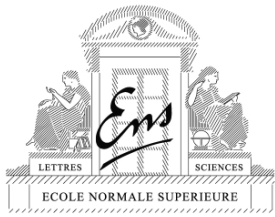
# Petite histoire de la discipline



# Petite histoire de la discipline



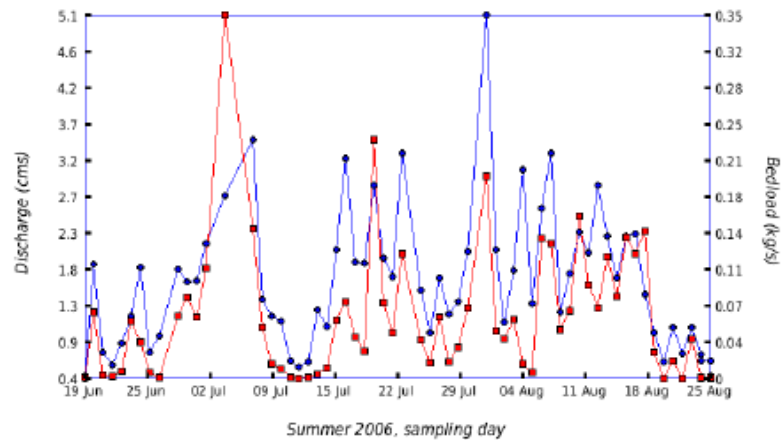




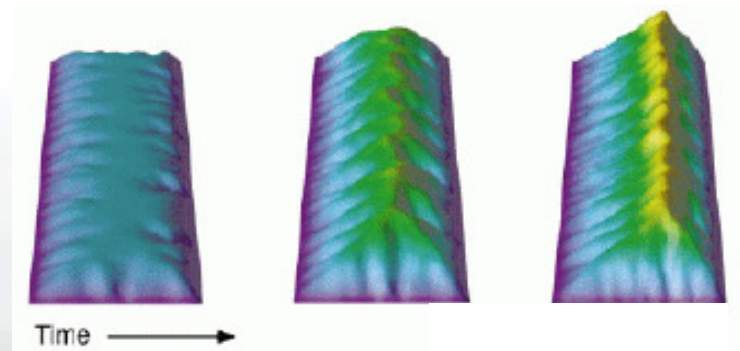
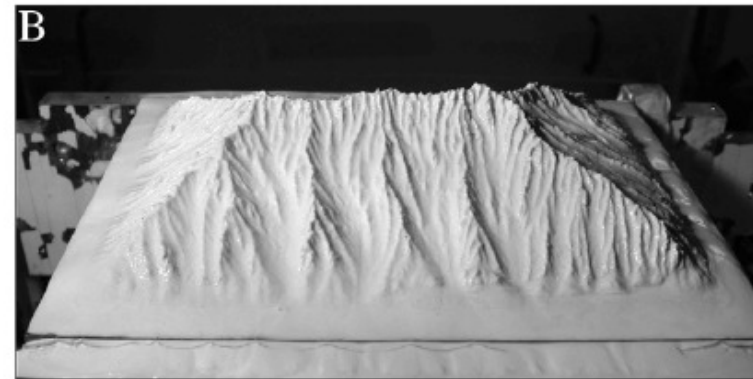
# Petite histoire de la discipline

## La révolution quantitative

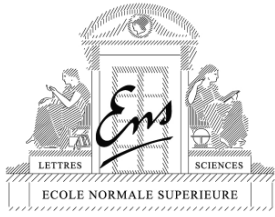
### Mesures



### Modèles



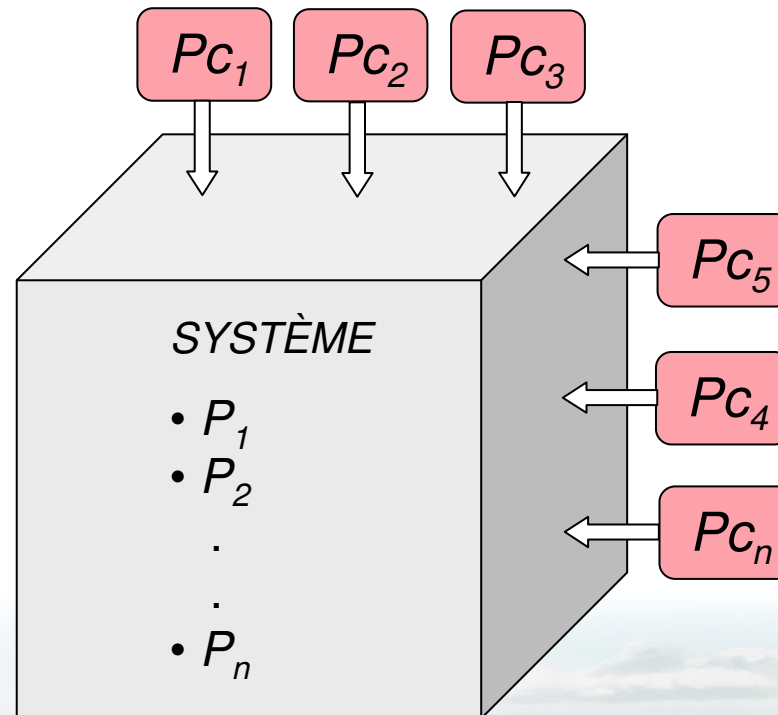


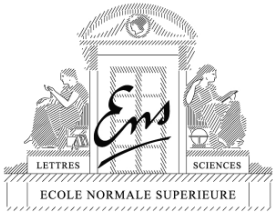


# À propos des modèles...

## Modèle quantitatif

Propriétés =  $f$  (paramètres indépendants)

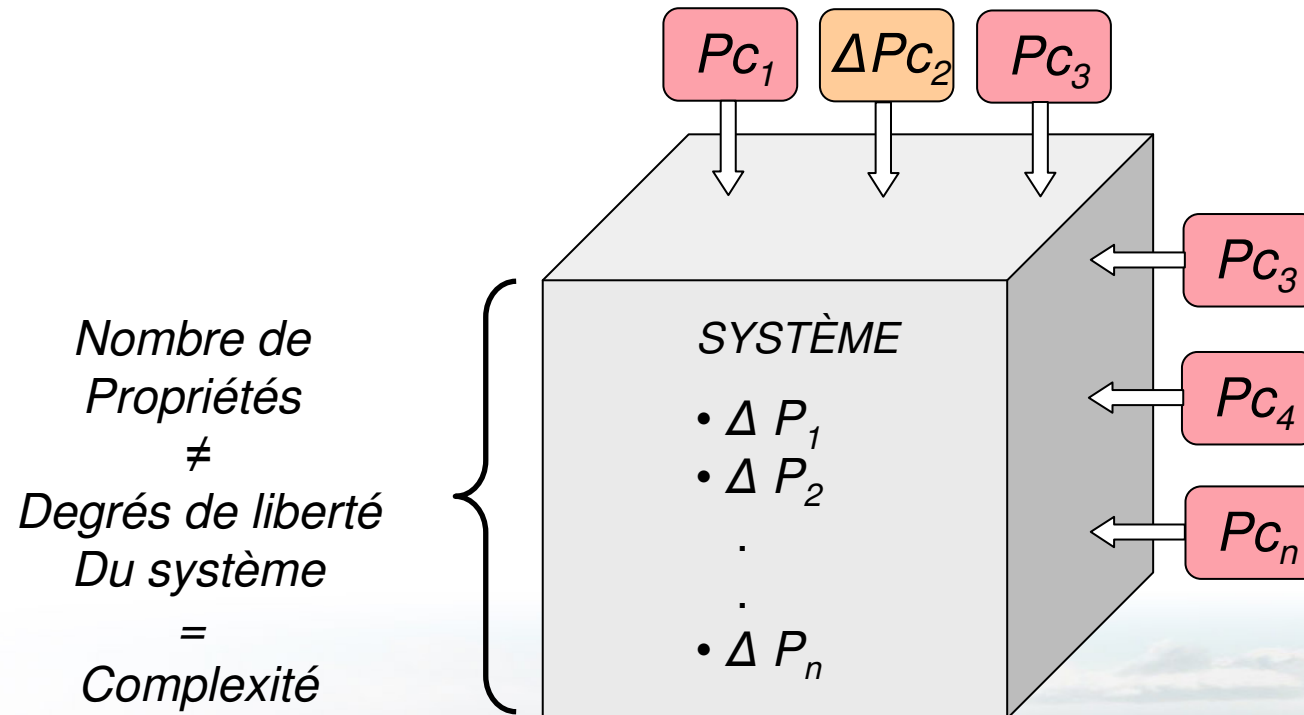




# À propos des modèles...

## Modèle quantitatif

Propriétés =  $f$  (paramètres indépendants)





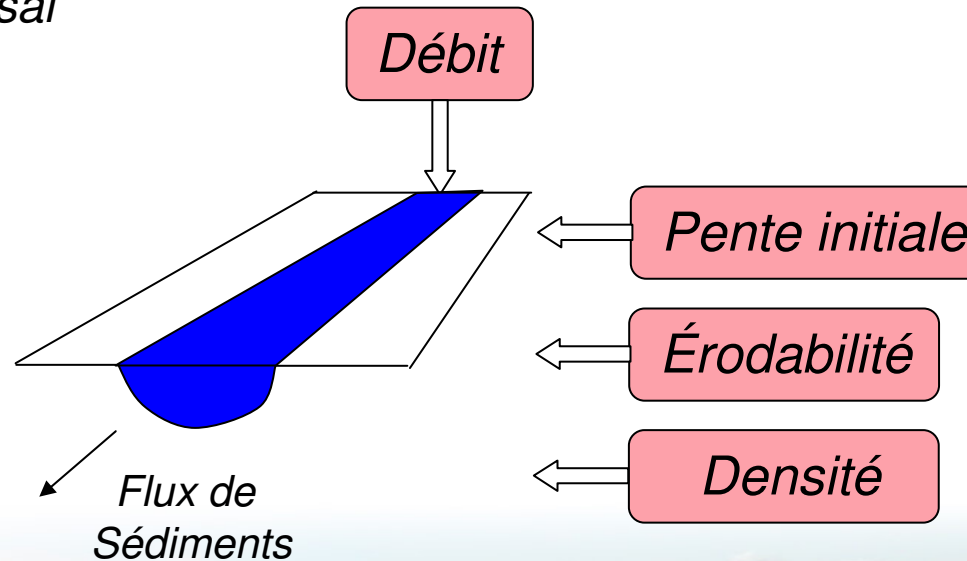
## À propos des modèles...

### Modèle quantitatif

Propriétés =  $f$  (paramètres indépendants)

#### *Portion de chenal*

- *Cisaillement basal*
- *Flux de sortie*
- largeur
- hauteur
- pente ( $t$ )



*Degrés de liberté du système = Nb de propriétés indépendantes*

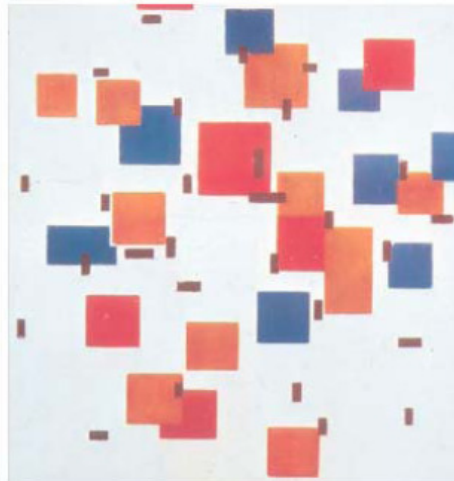


## À propos des modèles...

*Réalisme*



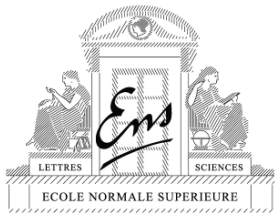
*Réalisme apparent*



*Réalisme statistique*



*Réalisme essentiel*



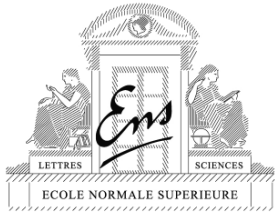
## À propos des modèles...

Réalisme « total »

- Modèle quantitatif hors de portée



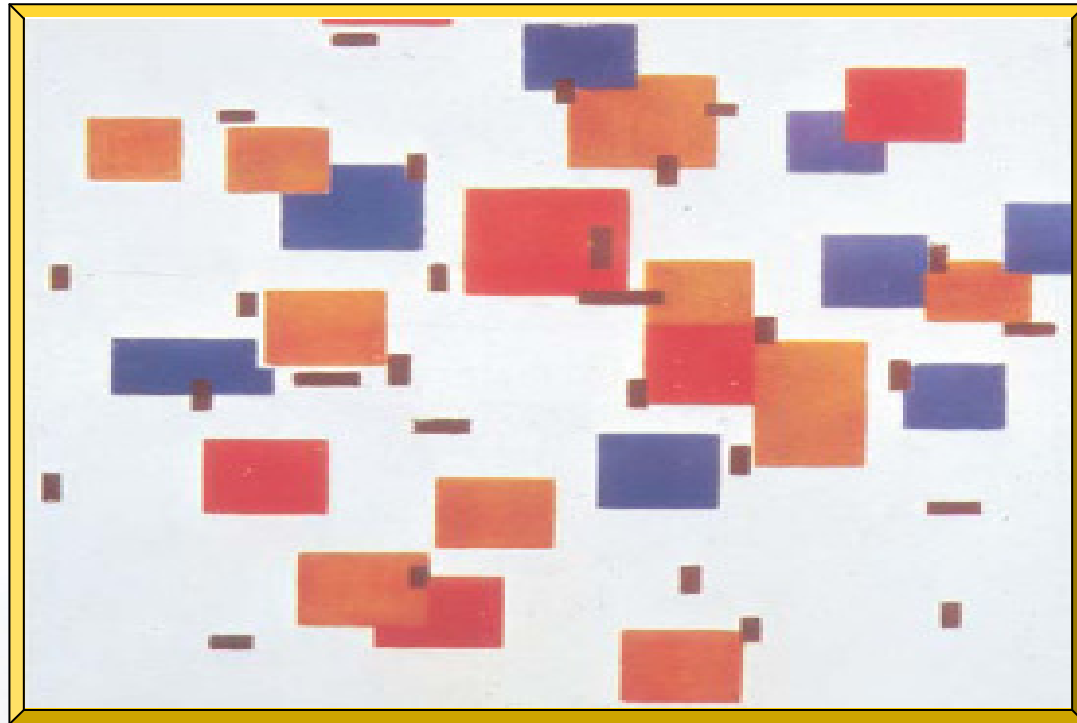
*Gustave Courbet*



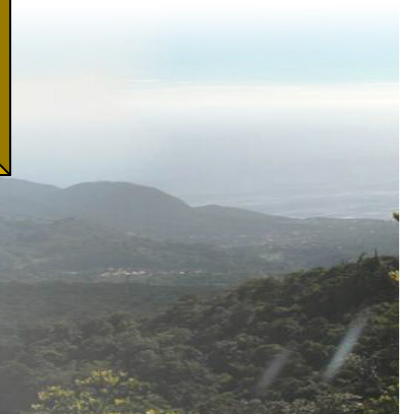
# À propos des modèles...

## Réalisme statistique

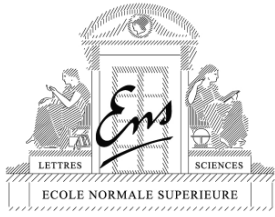
- Très Simple, hiérarchisant
- Utilisation indirecte seulement



*Mondrian*



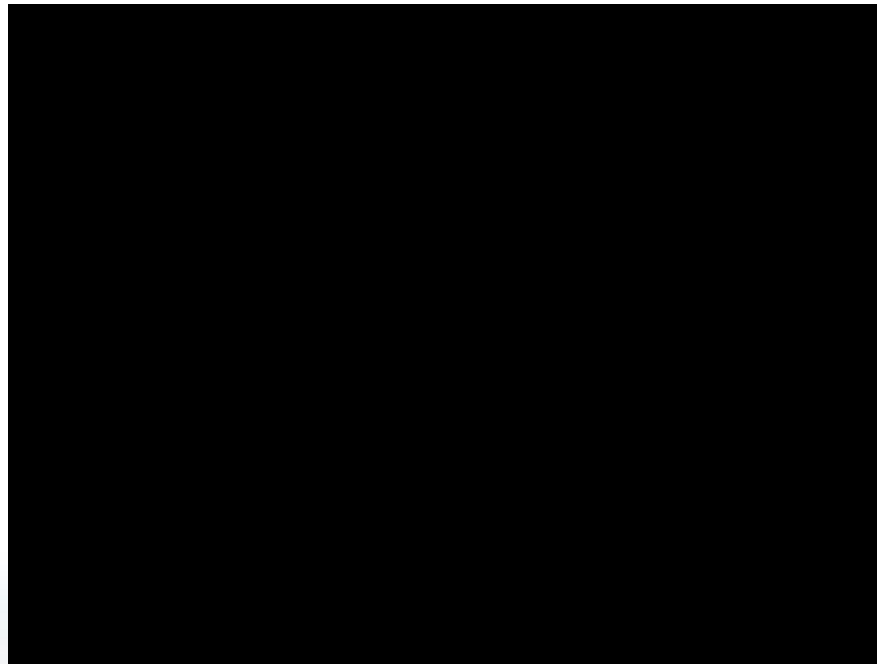




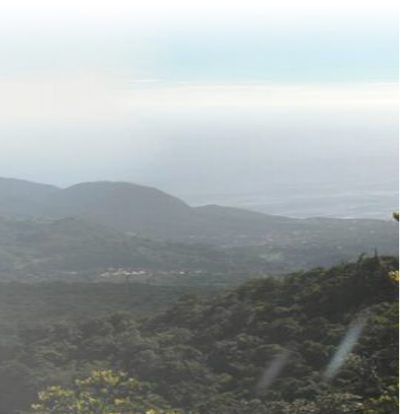
## À propos des modèles...

### Réalisme statistique

- Très Simple, hiérarchisant
- Utilisation indirecte seulement



*Ex: Moulin de Lorenz*





## À propos des modèles...

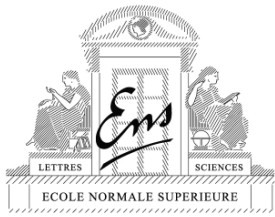
### Réalisme essentiel

- Simple
- Utilisation directe



*Paul Cézanne*





# Un peu de vocabulaire

## **Agents**

“Ce qui agit sur”

Eau, vent, gel, radiations solaires, vie...

## **Processus**

“Ensemble des étapes et mécanismes menant à une transformation”

Érosion, altération, transport, dépôt..

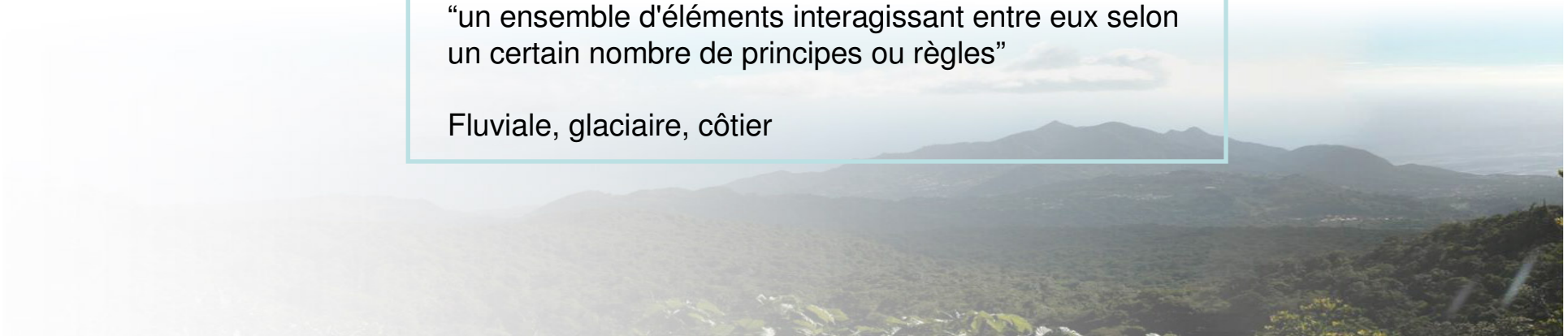
## **Énergie**

Solaire, géothermique, gravitationnelle, chimique...

## **Systemes**

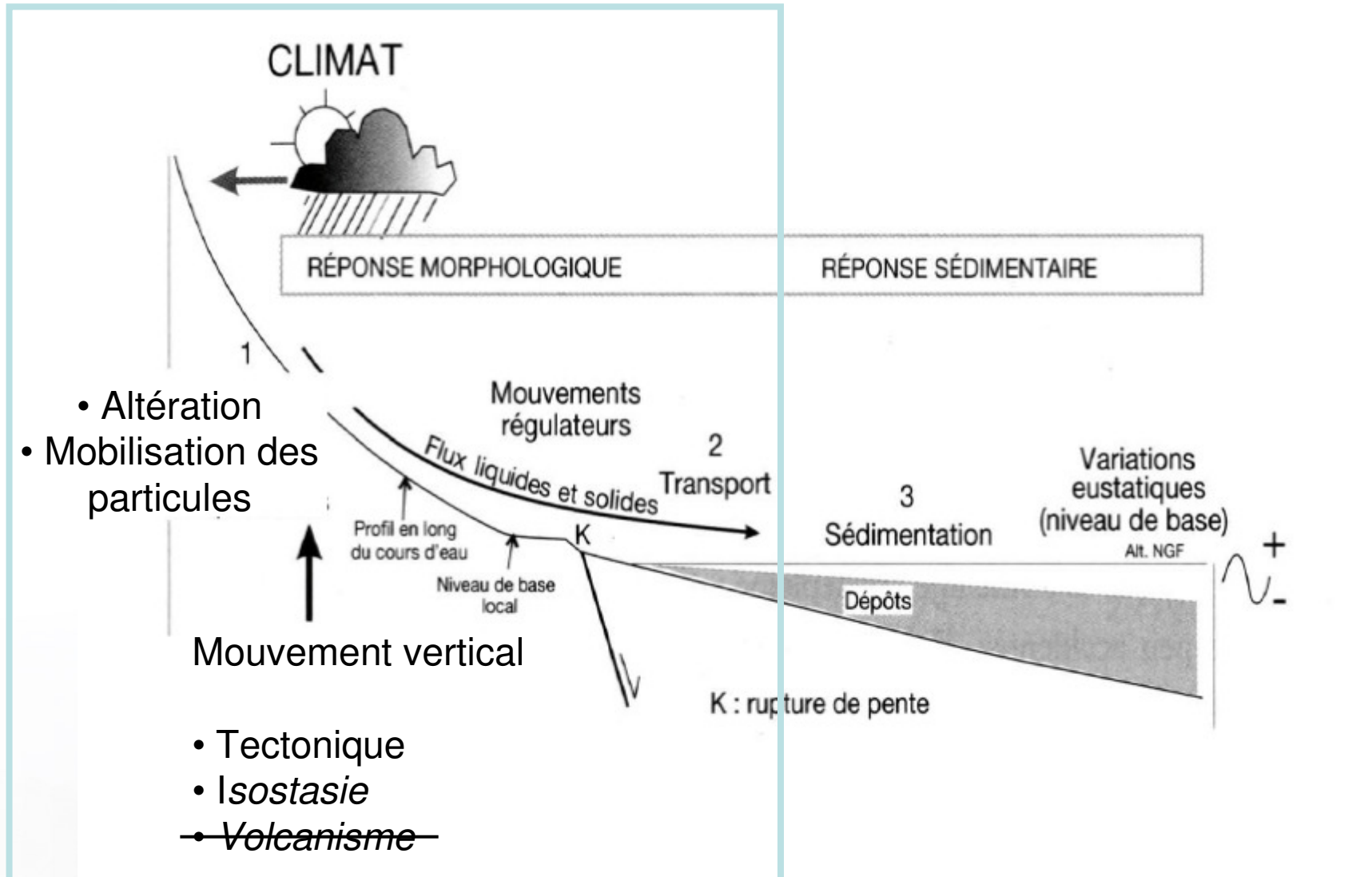
“un ensemble d'éléments interagissant entre eux selon un certain nombre de principes ou règles”

Fluviale, glaciaire, côtier



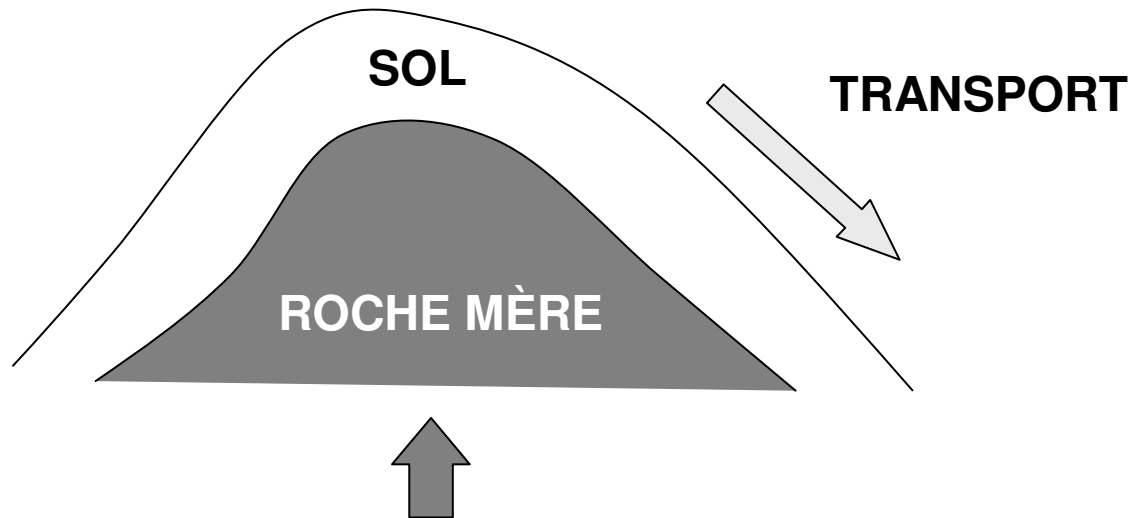


# Présentation du problème

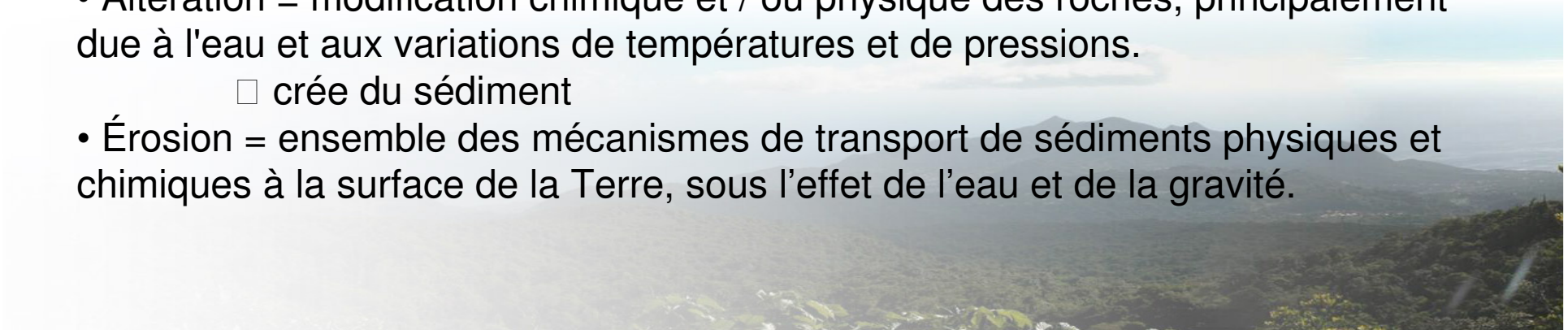


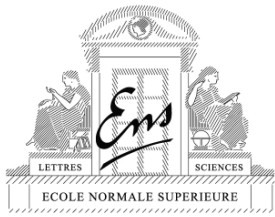
## Présentation du problème

**Paysage = résultat de la compétition entre tectonique, altération et érosion**



- Altération = modification chimique et / ou physique des roches, principalement due à l'eau et aux variations de températures et de pressions.
  - crée du sédiment
- Érosion = ensemble des mécanismes de transport de sédiments physiques et chimiques à la surface de la Terre, sous l'effet de l'eau et de la gravité.





# Présentation du problème

## Érosion chimique

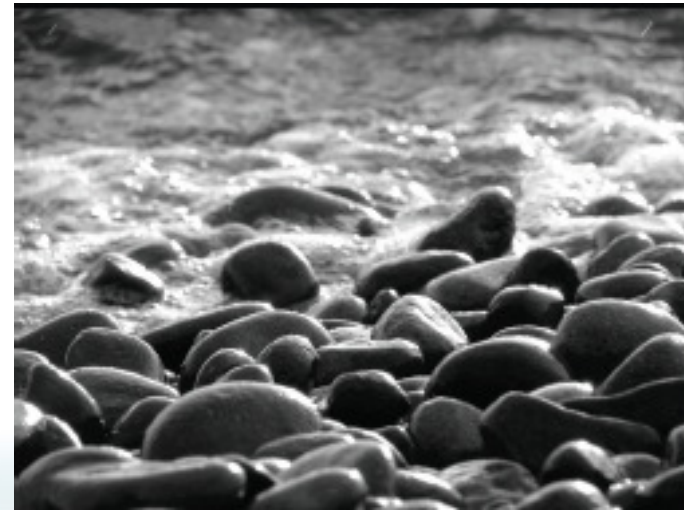
Transport d'éléments en solution



- $\text{HCO}_3^-$
- $\text{OH}^-$
- $\text{Na}^+$
- $\text{Ca}^{2+}$
- $\text{K}^+$
- $\text{Mg}^{2+}$
- $\text{Al}^{3+}$
- $\text{Fe}^{2+}$
- etc

## Érosion physique

Transport particulaire



modifie les reliefs



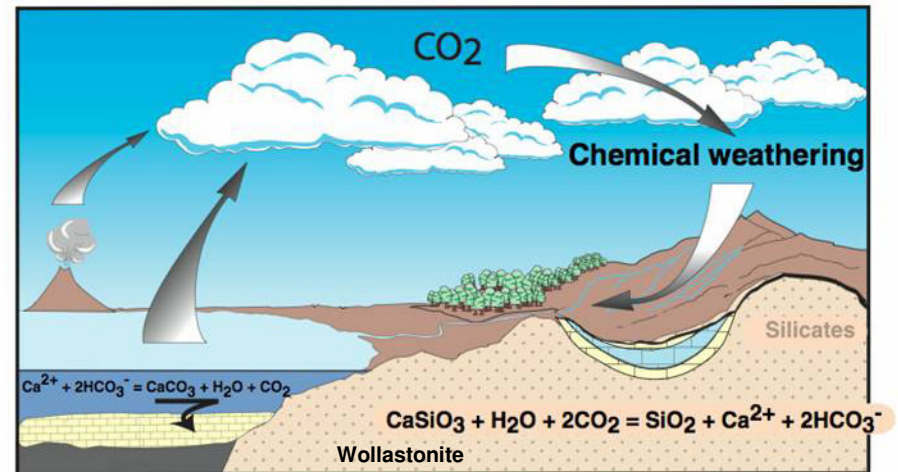
# Présentation du problème

## Érosion chimique

Transport d'éléments en solution



- $\text{HCO}_3^-$
- $\text{OH}^-$
- $\text{Na}^+$
- $\text{Ca}^{2+}$
- $\text{K}^+$
- $\text{Mg}^{2+}$
- $\text{Al}^{3+}$
- $\text{Fe}^{2+}$
- etc

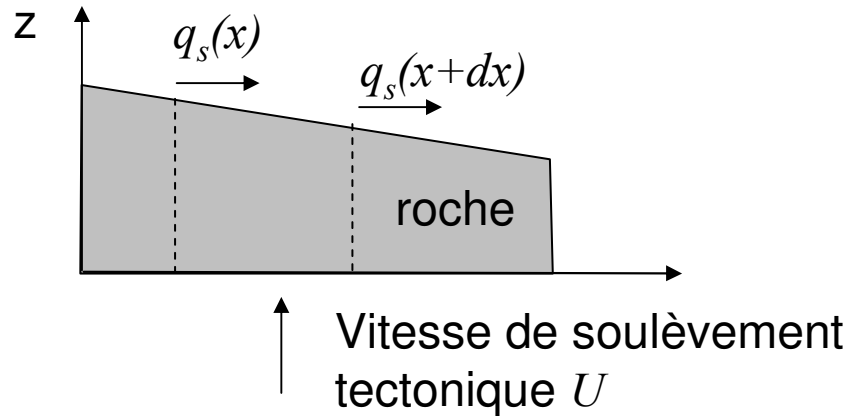


(Walker 1981)





## Formalisation du problème



(Dietrich et al. 2003)

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

Taux de surrection  $U$   $[L][T]^{-1}$

Taux d'érosion  $E$   $[L][T]^{-1}$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - E$$

$q_s$  Flux de matière / unité de largeur

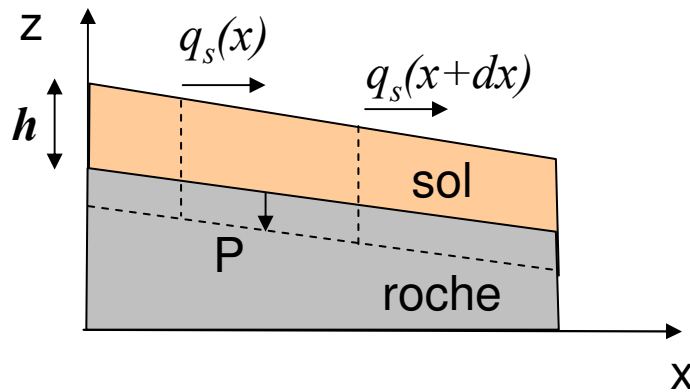
$$E = \frac{q_s(x+dx) - q_s(x)}{dx}$$

$$E = \frac{\partial q_s}{\partial x}$$



# Formalisation du problème

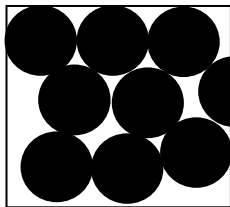
Conservation de la masse dans la couche de sol:



$P$  = taux de production de sol  $[L][T]^{-1}$   
(soil production rate)

$$\frac{\partial h}{\partial t} = P - \frac{\rho_r}{\rho_s} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

Volume de contrôle  $dV$



$$\rho_s dV = \rho_r dV_{roche} + \cancel{\rho_p dV_{pores}}$$

$$dV = dV_{roche} + dV_{pore}$$

$$dV = dV_{roche} + \lambda dV$$

$$dV = \frac{1}{(1-\lambda)} dV_{roche}$$

$$\frac{\rho_s}{\rho_r} = (1-\lambda)$$

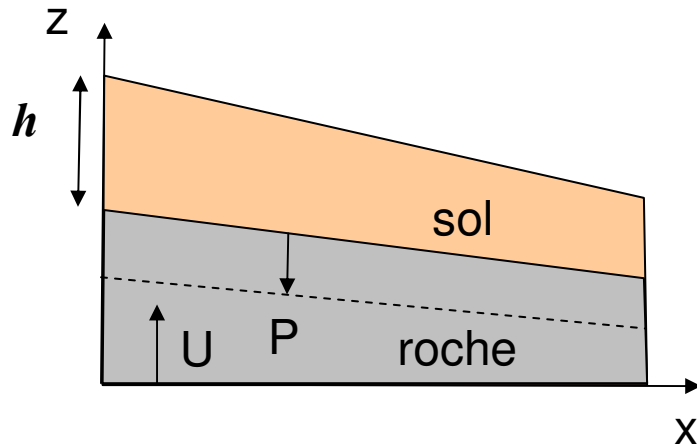
Porosité :  $\lambda = \frac{dV_{pore}}{dV}$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = P - \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$



# Formalisation du problème

Conservation de la masse dans un relief couvert d'une couche de sol :



$P$  = taux de production de sol  $[L][T]^{-1}$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - P + \frac{\partial h}{\partial t}$$

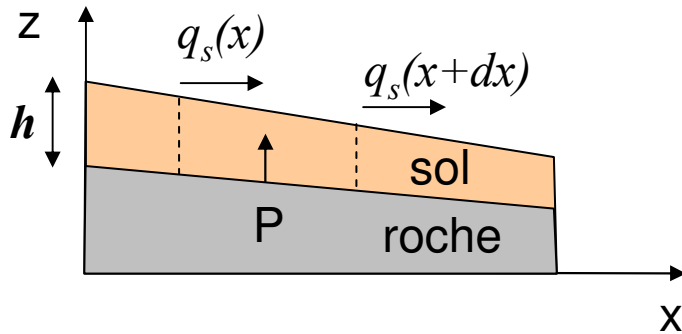
$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - \cancel{P} + \cancel{P} - \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

# Formalisation du problème

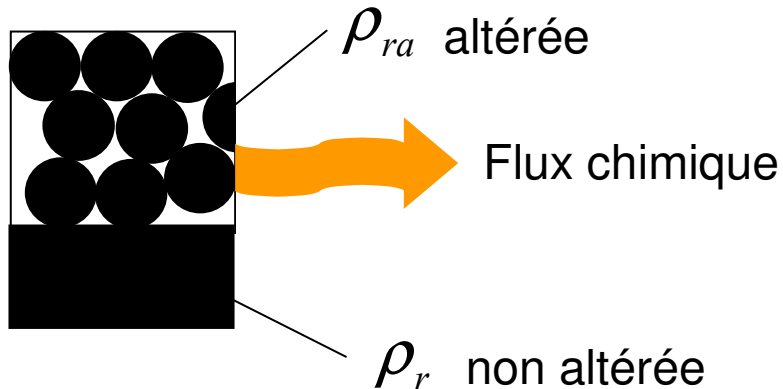


On a négligé :



$P$  = taux de production de sol  $[L][T]^{-1}$

$$\rho_s \frac{\partial h}{\partial t} = \rho_r P - \rho_s \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

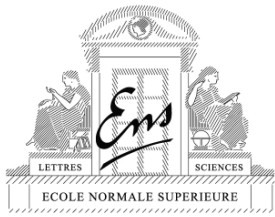


Effet de l'altération chimique

$$\rho_{ra} \neq \rho_r$$



Flux de matière dissoute



## Formalisation du problème

$$\frac{\partial h}{\partial t} = P - \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = U - \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x}$$

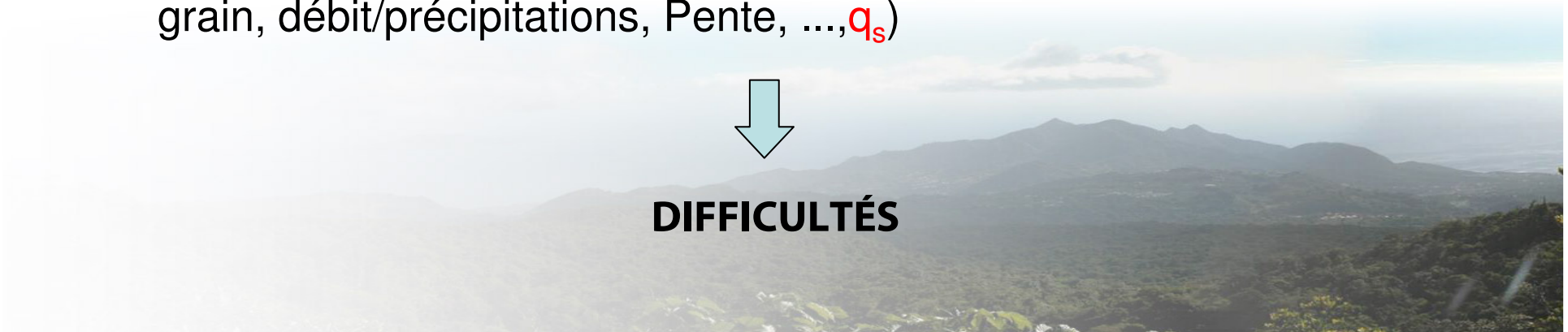
Notre problème majeur est de déterminer les lois gouvernant les flux d'érosion (ou lois de transport géomorphologiques) et les fonctions de production :

$q_s = f(\text{Processus, Tectonique, Précipitation, Lithologie, taille de grain, débit/précipitations, Pente, ..., } P)$

$P = f(\text{Processus, Tectonique, Précipitation, Lithologie, taille de grain, débit/précipitations, Pente, ..., } q_s)$



**DIFFICULTÉS**





1. La loi de transport dépend de la nature du processus impliqué:

**Gravitaire**

*Teneur en eau croissante*



Éboulis



Coulée de débris



Coulée de boue

**Cisaillement fluide**

*Viscosité du fluide décroissante*



Glaciaire

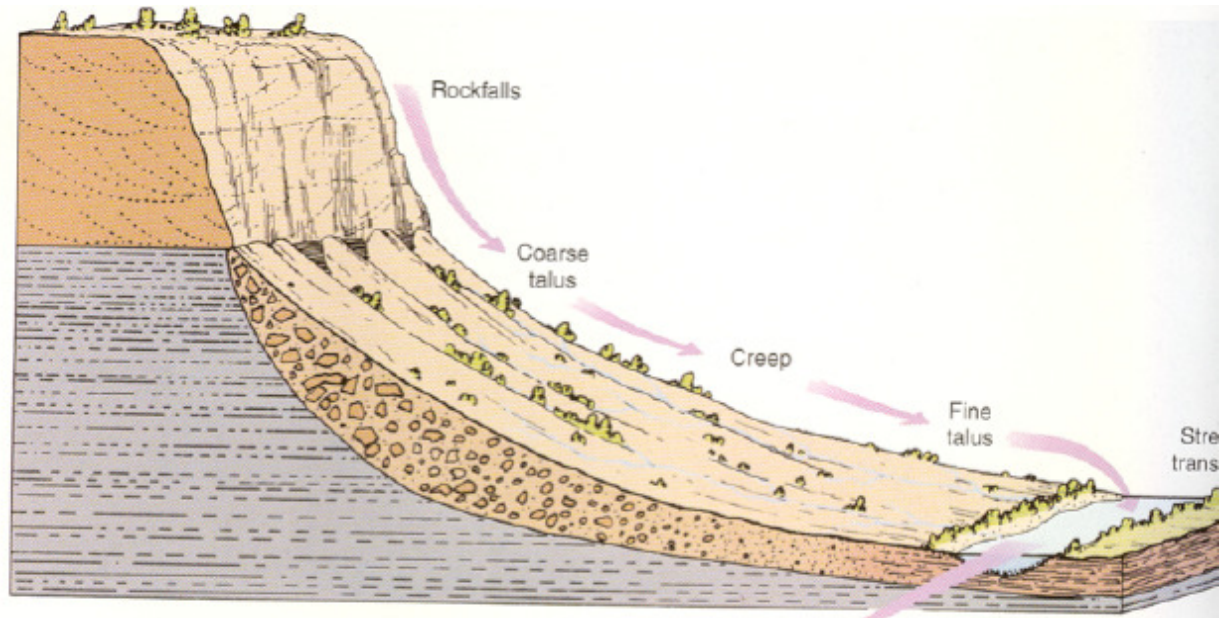


Fluvial



Éolien

## 2. Les différents processus évoluent graduellement

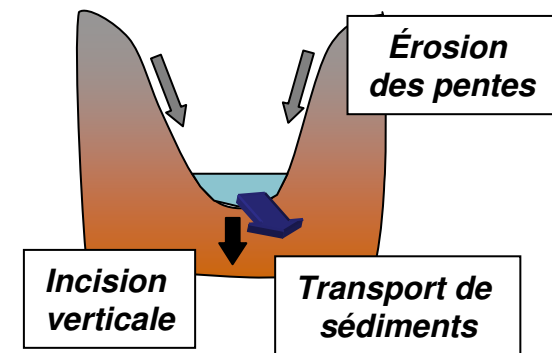




### 3. Couplage des processus



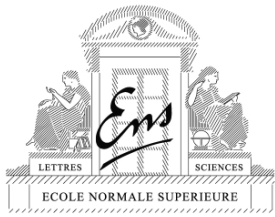
Ürümqi he, Chine



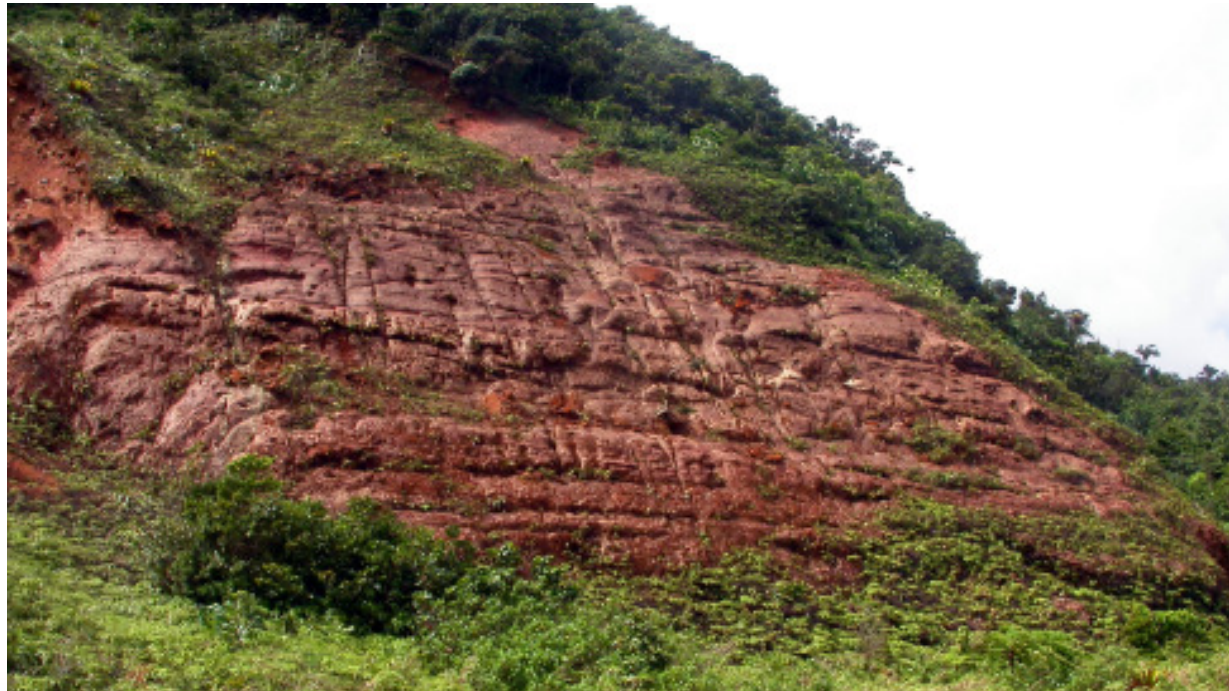
Couplage versant/rivière







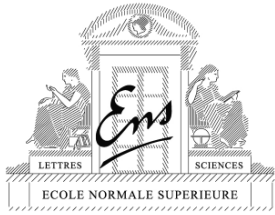
### 3. Couplage des processus



*Guadeloupe*

Couplage altération/érosion mécanique

$$P = f(q_s)$$



## 4. Forçages extérieurs

Différences de forçage:

- climat et végétation
- lithologie
- anthropisation



*Vallée du Lot*

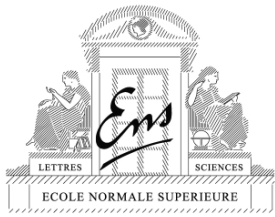


*Kuitun he, Chine*

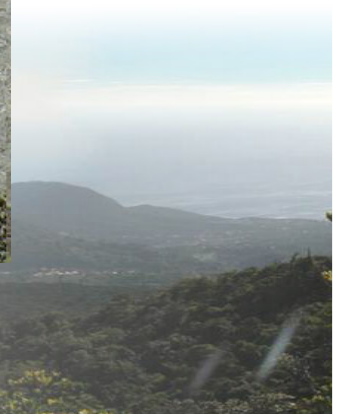


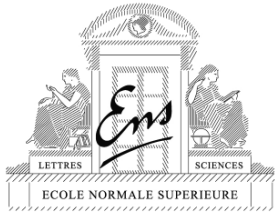
*Gorges du Tarn*



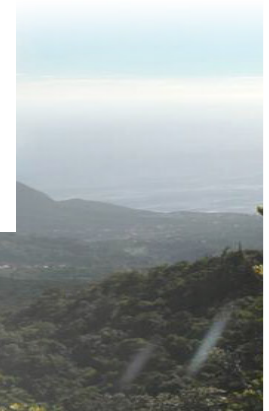
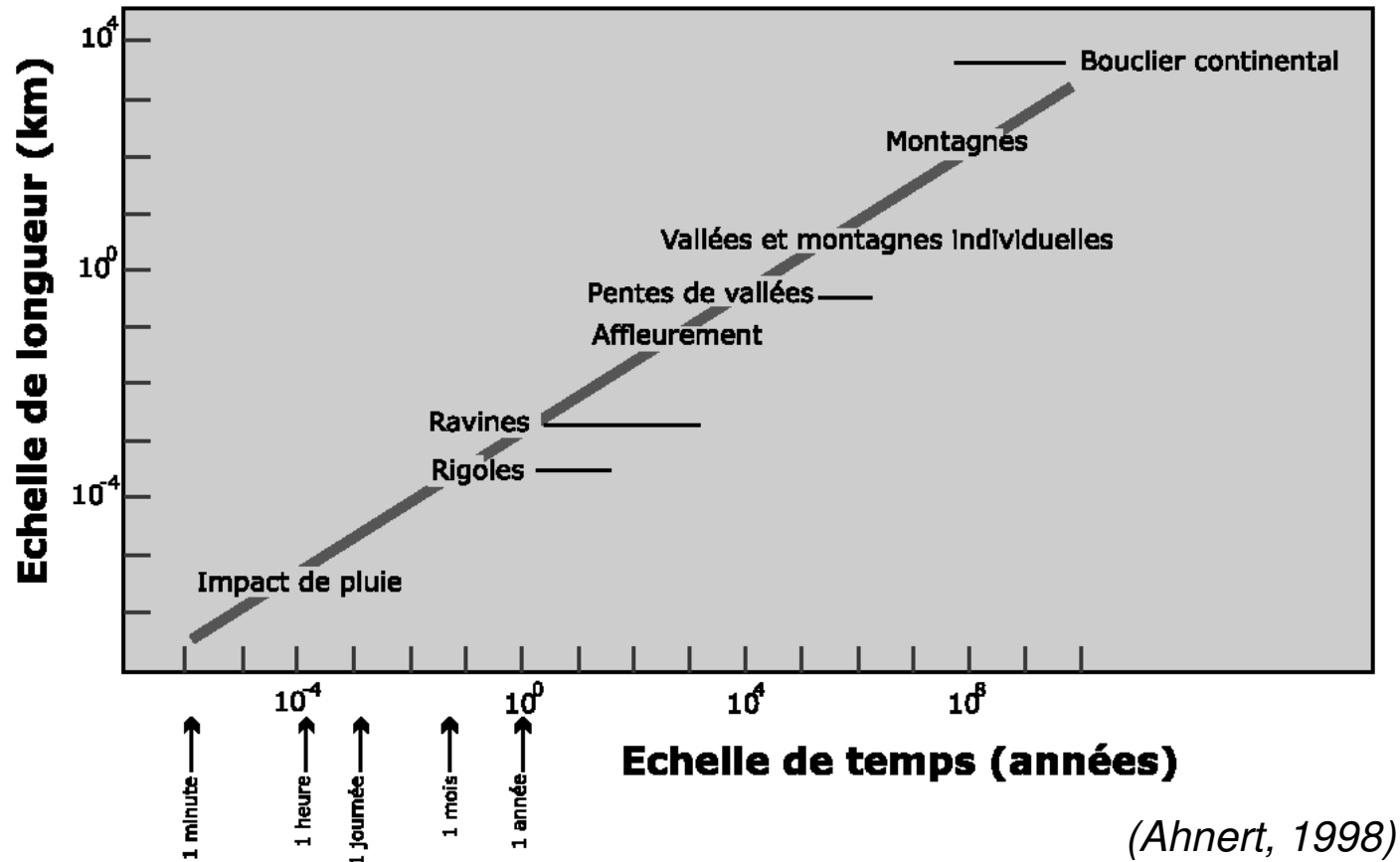


## 4. Forçage anthropique

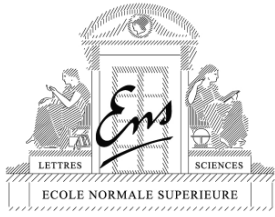




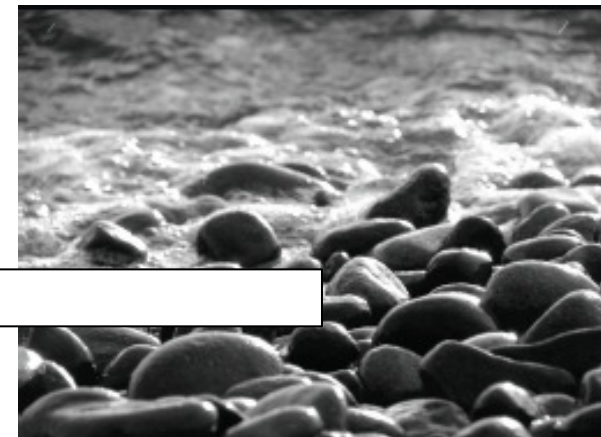
5. La dynamique d'évolution d'un paysage (et donc la loi de transport) dépend de l'échelle d'observation.







## 5. La dynamique d'évolution d'un paysage (et donc la loi de transport) dépend de l'échelle d'observation.



### **grande échelle** (Chaîne, bassin versant)

idée = lien entre le flux de sédiments en sortie et les propriétés moyenne du bassin  
[Ahnert, 1970; Pinet and Souriau, 1988, ...]

couplage tectonique, érosion, climat.

10 - 10<sup>4</sup> km  
10<sup>3</sup> - 10<sup>8</sup> ans

### **Échelle intermédiaire** (Rivière, versant, ...)

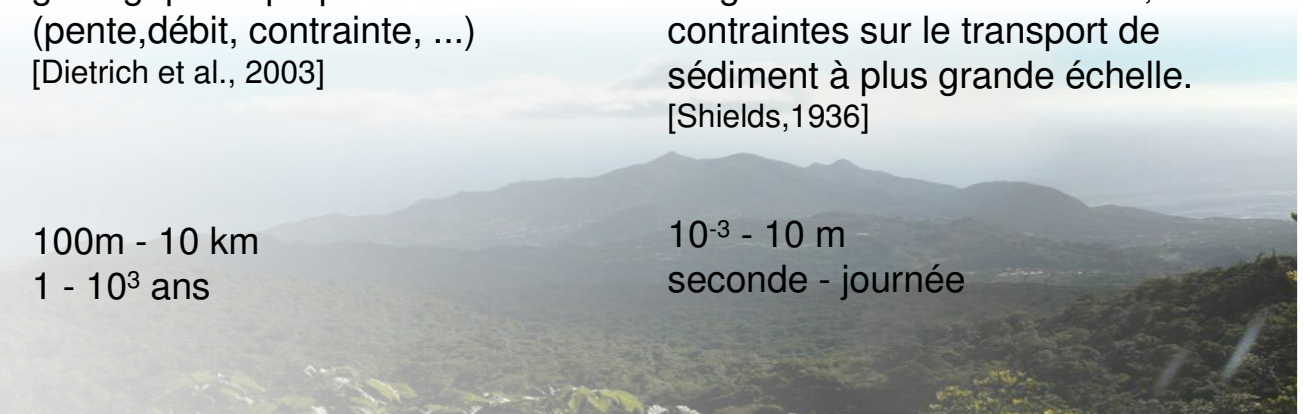
idée = lien entre flux de sédiments à l'échelle des temps géologique et propriétés locales (pente, débit, contrainte, ...)  
[Dietrich et al., 2003]

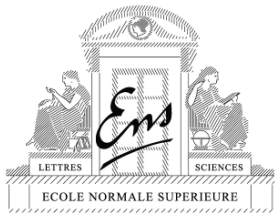
100m - 10 km  
1 - 10<sup>3</sup> ans

### **Échelle élémentaire** (processus physique)

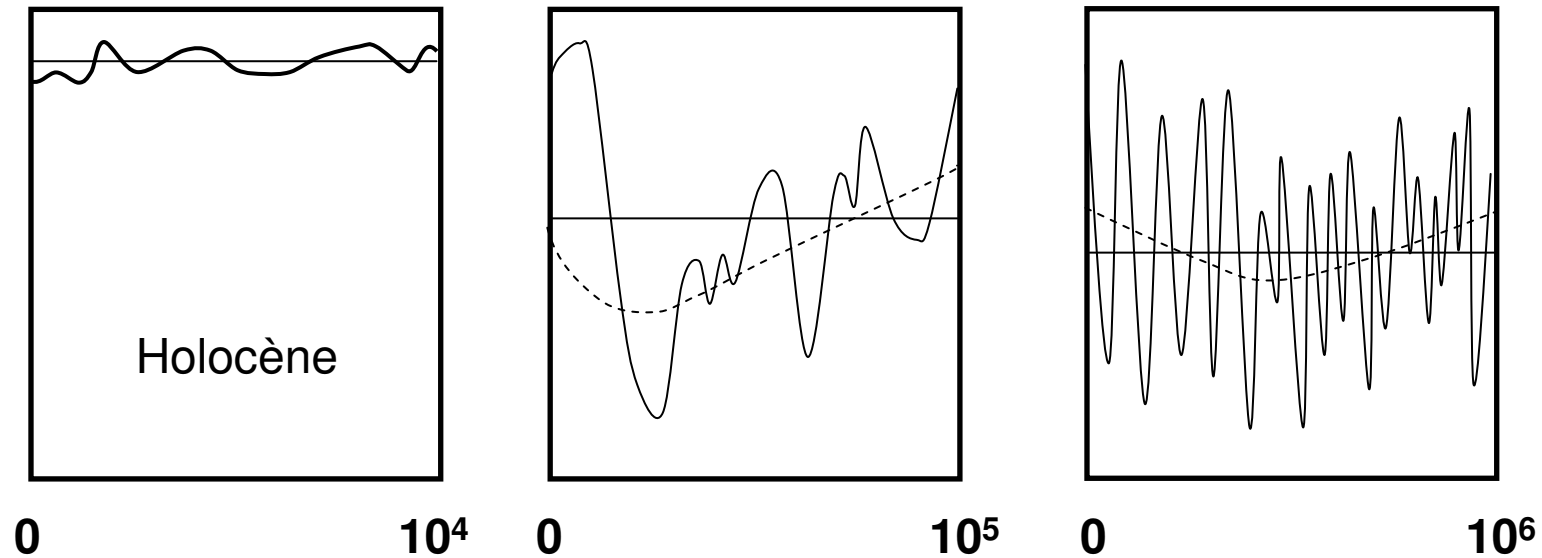
échelle de l'interaction grain/fluide dans une rivière, échelle du glissement sur un versant, ... contraintes sur le transport de sédiment à plus grande échelle.  
[Shields, 1936]

10<sup>-3</sup> - 10 m  
seconde - journée





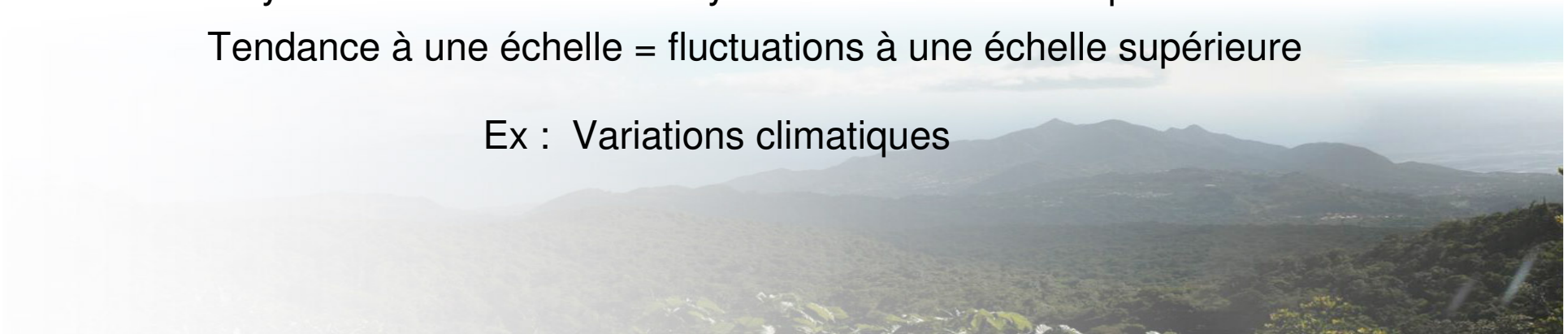
5. La dynamique d'évolution d'un paysage (et donc la loi de transport) dépend de l'échelle d'observation.



Moyenne à une échelle  $\neq$  moyenne à une échelle supérieure

Tendance à une échelle = fluctuations à une échelle supérieure

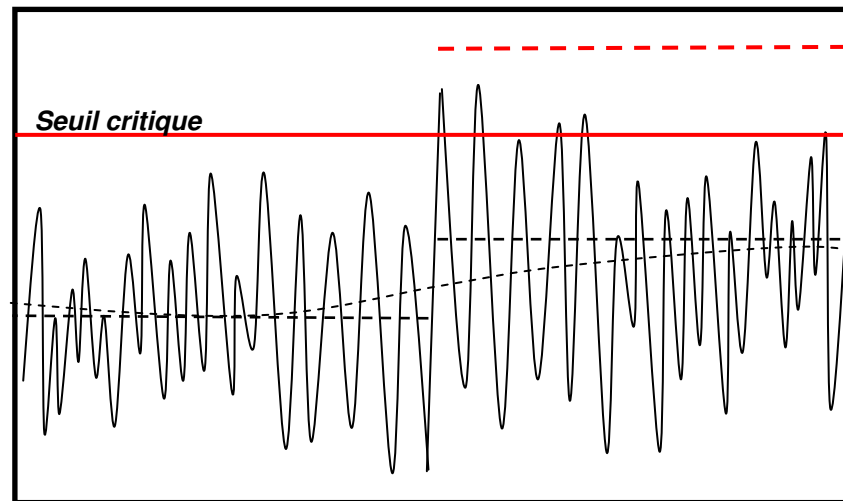
Ex : Variations climatiques





5. La dynamique d'évolution d'un paysage (et donc la loi de transport) dépend de l'échelle d'observation.

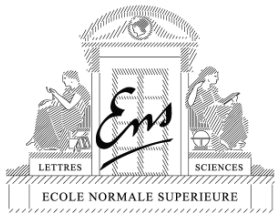
Équilibre dynamique  
=  
Fluctuations autour d'une  
moyenne



**Systeme à seuil**  
couplage fluctuations/moyenne

Changement d'équilibre irréversible





# Une controverse moderne

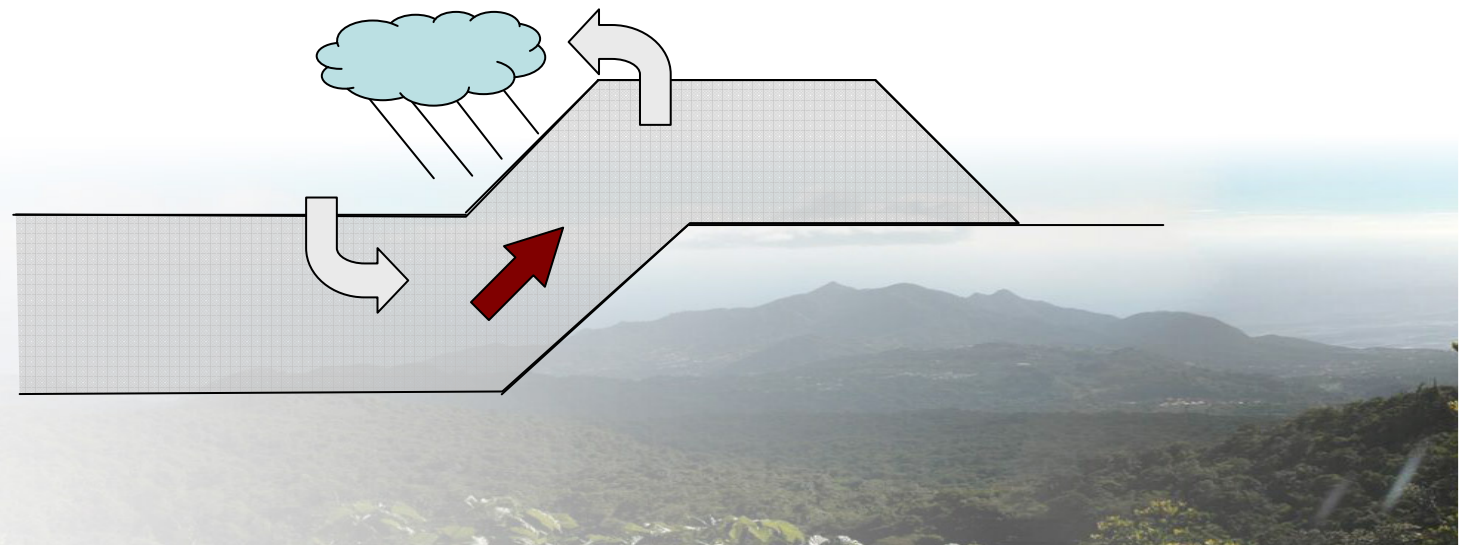


REVIEW ARTICLE

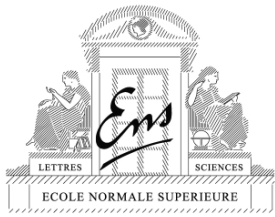
## Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg?

Peter Molnar & Philip England

The high altitudes of most mountain ranges have commonly been ascribed to late Cenozoic uplift, without reference to when crustal thickening and other tectonic processes occurred. Deep incision and recent denudation of these mountain ranges, abundant late Cenozoic coarse sediment near them, and palaeobotanical evidence for warmer climates, where high mountain climates today are relatively cold, have traditionally been interpreted as evidence for recent uplift. An alternative cause of these phenomena is late Cenozoic global climate change: towards lower temperatures, increased alpine glaciation, a stormier climate, and perturbations to humidity, vegetative cover and precipitation.





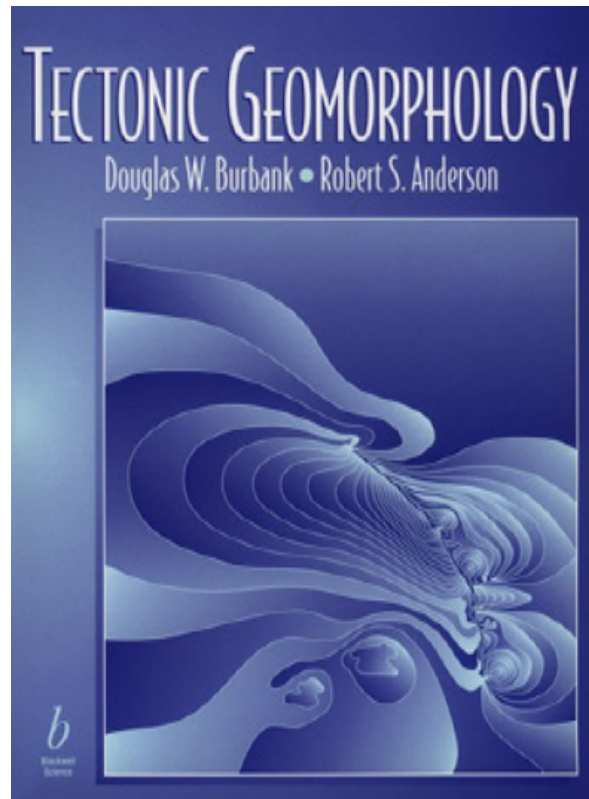


## Et des questions...

- How do you determine mean elevation in the past?
- During Ice Age time, was there more precipitation or less?
- Can enhanced erosion drive uplift of mountain summits?
- How do we tell whether the climate caused uplift of the summits or whether surface uplift of the ranges caused changes in climate?
- What controls the ultimate height of mountains ?



# Référence



**D.W. Burbank & R.S. Anderson:** *Tectonic Geomorphology* (Blackwell Science, 2001)