



2015

Année internationale
des sols

Introduction à la Science Sol

Les enjeux du sol

Jean Louis Morel

Laboratoire Sols et Environnement (LSE)

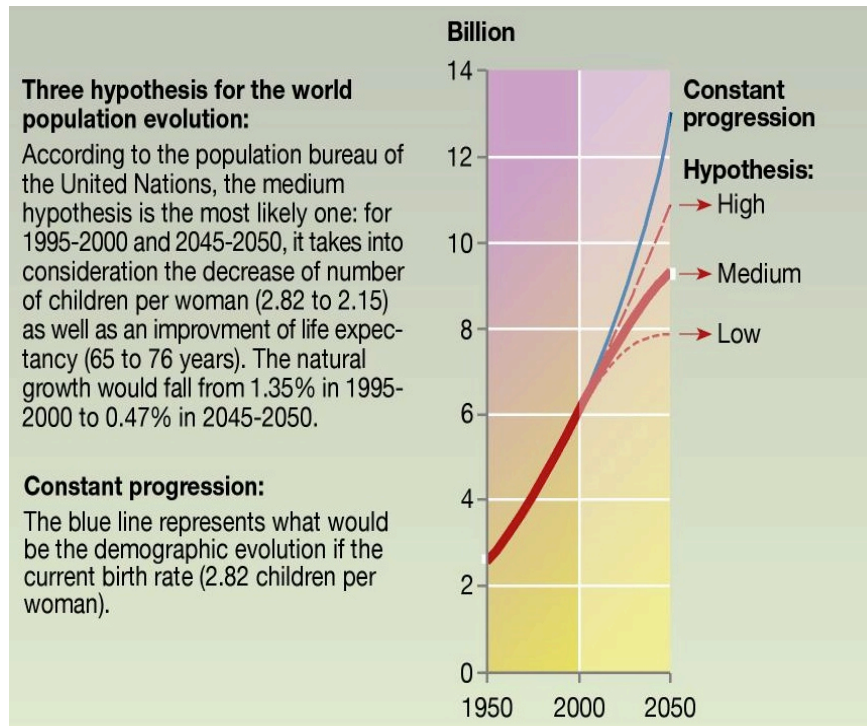
UMR 1120 UL-INRA

lse.univ-lorraine.fr

gisfi.fr

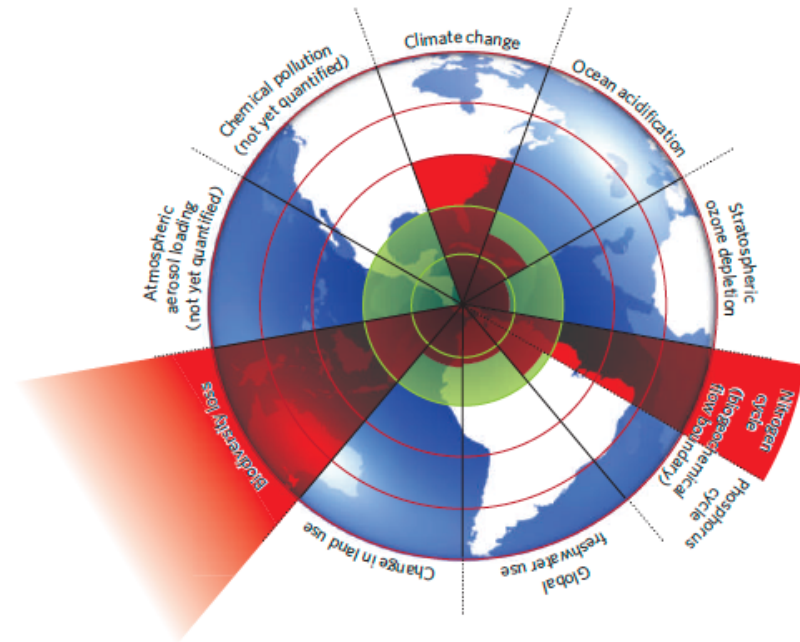
Une planète limitée soumise à la pression humaine croissante

La population mondiale pourrait atteindre 9,6 milliards en 2050



Sources : *The World at Six Billion* (October 1999) and *World Population Prospects: The 2006 Revision* (February 2007), United Nations, department of social and economics affairs, population division, New York.

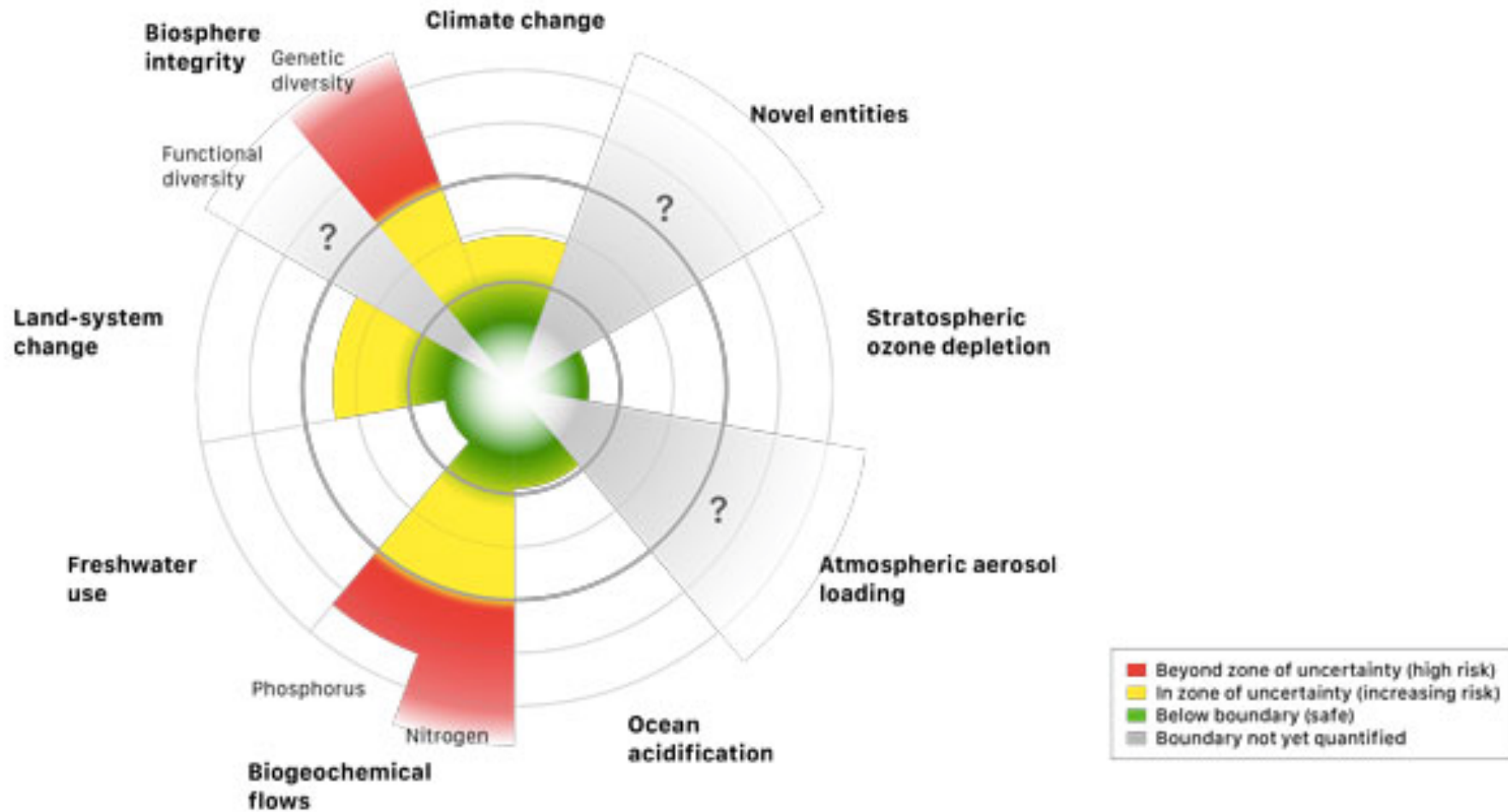
Transgression des limites de la planète (2009)



From Holocene to Anthropocene

Rockstrom et al., 2009, Nature

Steffen et. al, 16 Janvier 2015, Science



Plan du cours

- **1. Éléments de pédologie**
 - Qu'est-ce qu'un sol ?
 - Le profil
 - Diversité des sols
 - Les fonctions du sol et les services rendus
- **2. Les enjeux du sol**
 - Une ressource limitée
 - Dégradation des sols
 - Changements climatiques
 - Raréfaction des ressources
 - Érosion de la biodiversité
 - Contamination de l'environnement
 - Urbanisation – imperméabilisation
 - Exploration spatiale
- **3. Conclusion**

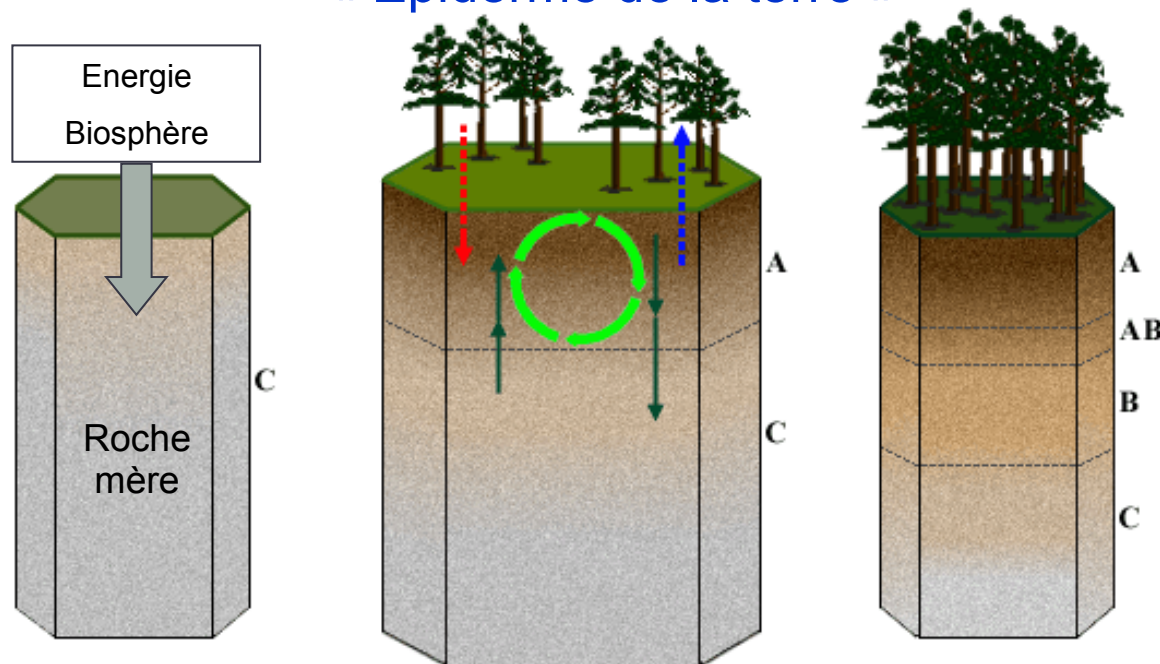
1. ELÉMENTS DE PÉDOLOGIE

1.1 – QU'EST-CE QU'UN SOL ?

Le sol est le produit de la transformation de la roche mère sous-jacente

« Epiderme de la terre »

COMPLEXITE



La formation des sols est un processus très lent

PROCESSUS : altération, transport, accumulation

Juma & Nickel

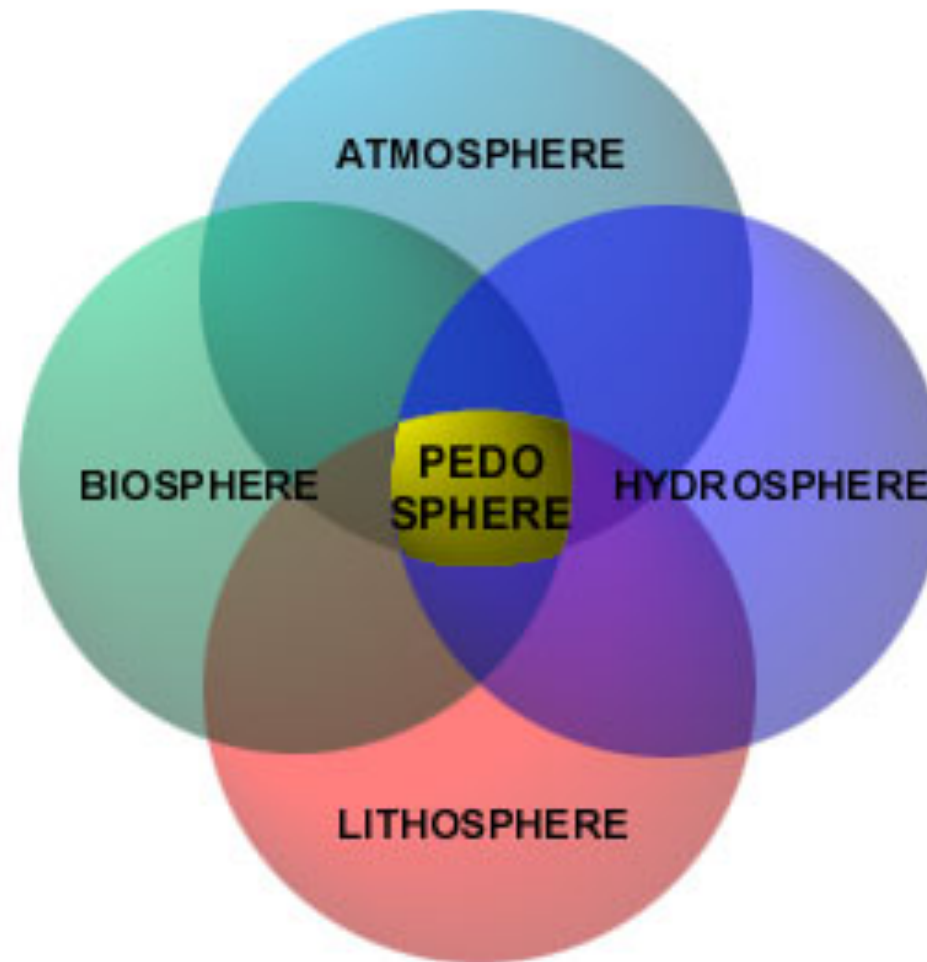
Eau + agents chimiques + température + gravité

FACTEURS : climat, végétation, topographie



Développement du profil

Le sol est une interface



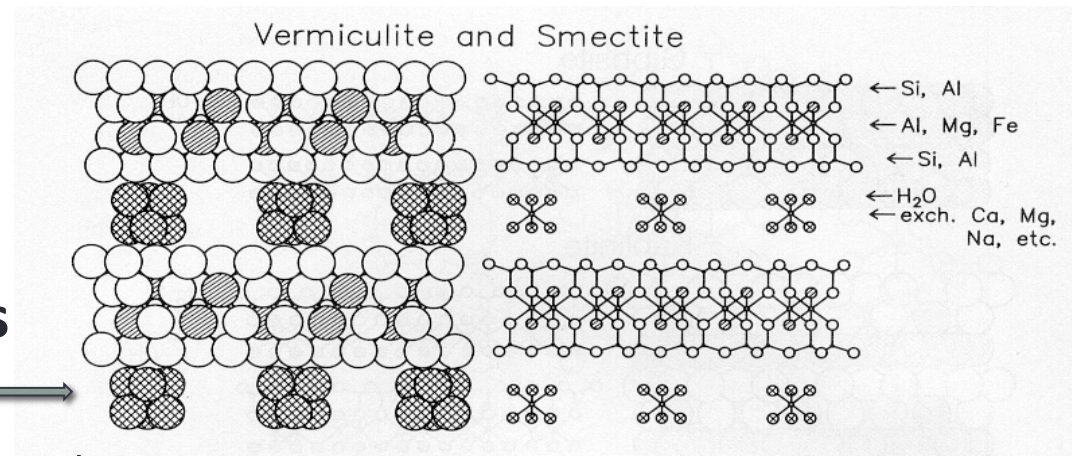
du grec ancien [πέδον](#) *pedon* = *sol*

Juma and Nickel

Le sol est un milieu organo-minéral

- **Matière minérale**

- minéraux primaires
- minéraux secondaires
 - argiles
 - oxy-hydroxydes (Al, Fe, Mn) : $\alpha\text{-FeOOH}$, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$



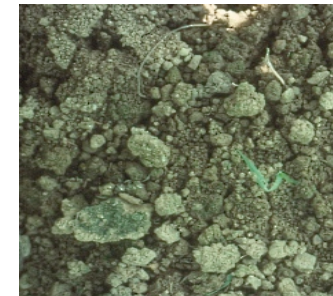
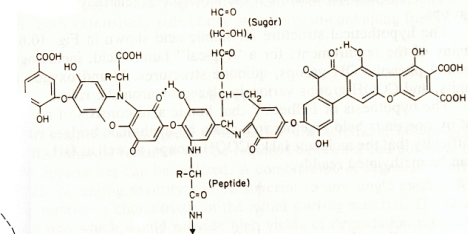
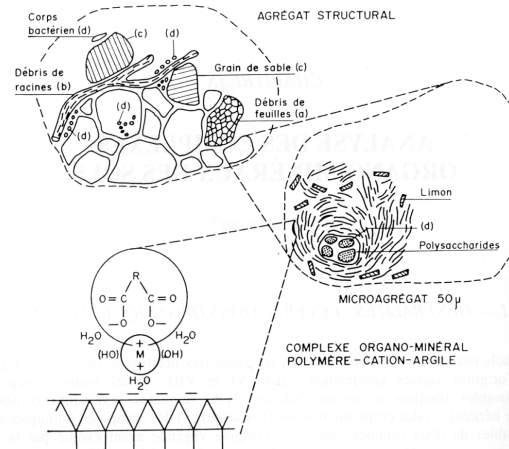
- **Matière organique**

- débris végétaux et animaux

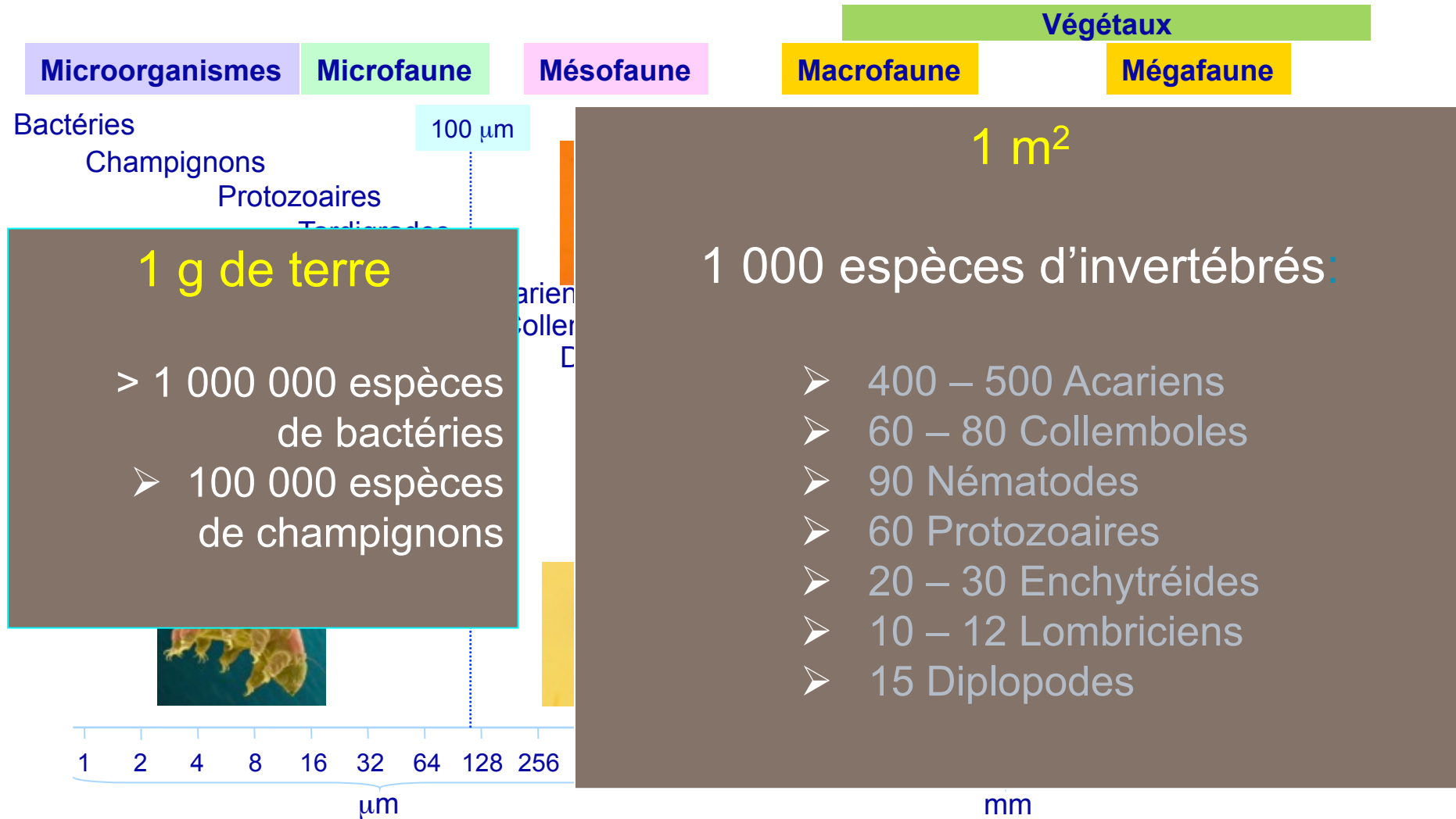
- **Complexe organo-minéral**

matière organique fraîche

composés humiques



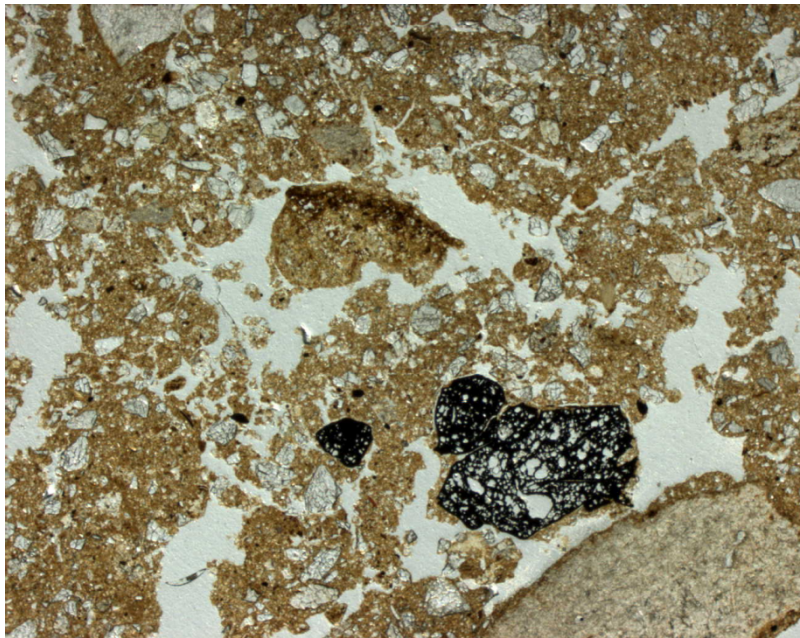
Le sol est un système biologique



Modifié d'après Swift et al. (1979) par L. Ranjard.

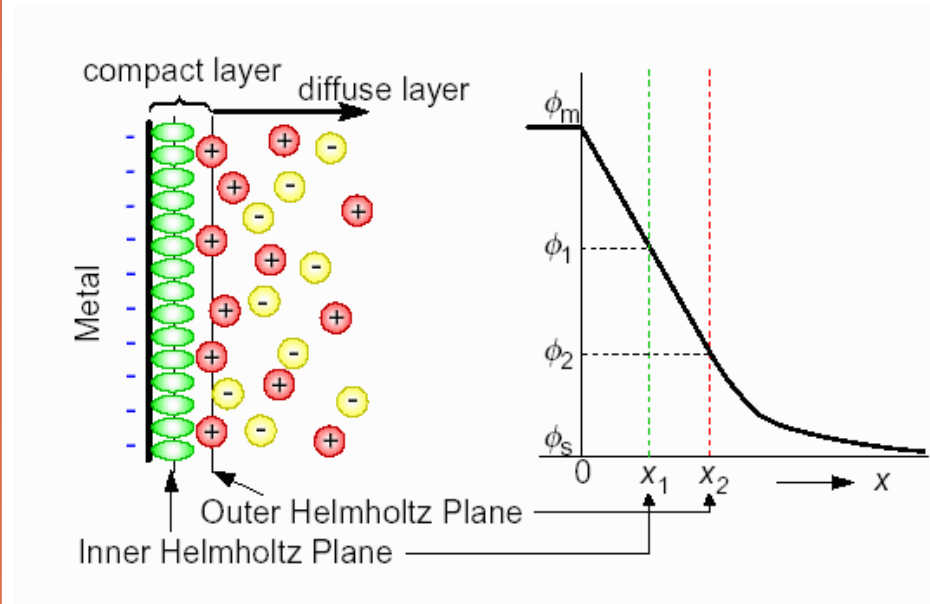
Le sol est un milieu poreux et échangeur d'ions

Matière minérale, matière organique, associations organo-minérales



Lame mince de sol - porosité (blanc)
(microscopie optique)

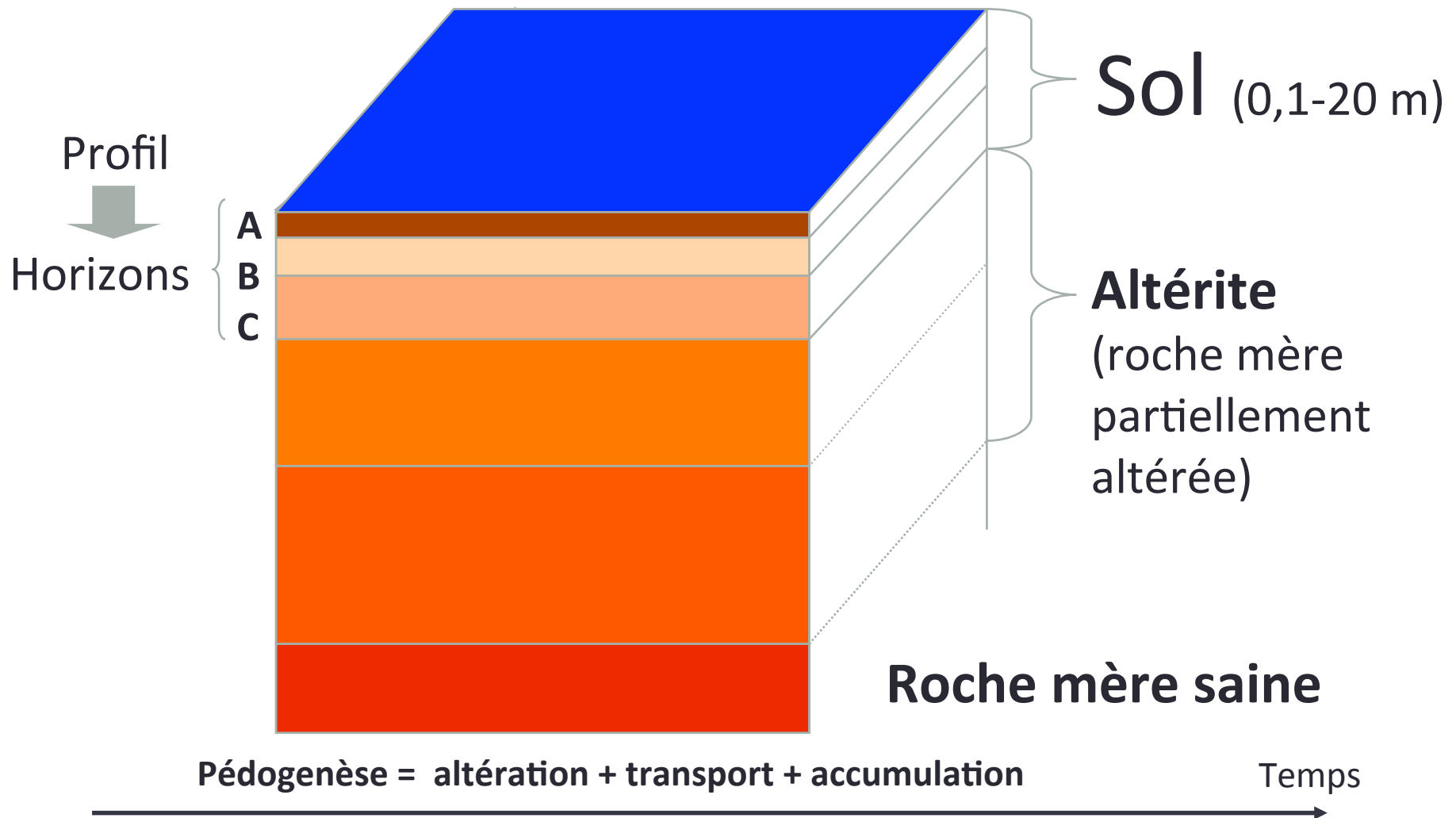
Echange d'ions



Colloïdes organo-minéraux chargés

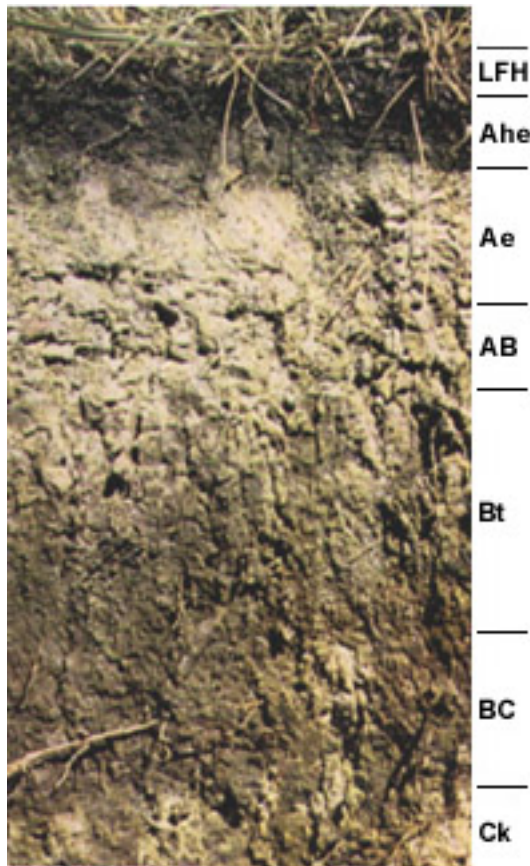
1.2 LE PROFIL

Le profil pédologique : ensemble des horizons qui résultent de la transformation de la roche mère



Les horizons caractéristiques d'un profil pédologique

Exemple de profil de LUVISOL



Litière : dépôts de débris végétaux

A : horizons de surface

contiennent de la matière organique
perdent des éléments : lixiviation, lessivage

AB : horizon de transition

B : horizons de profondeur

issus de l'altération de la roche mère
accumulent des éléments : argiles, matières organiques

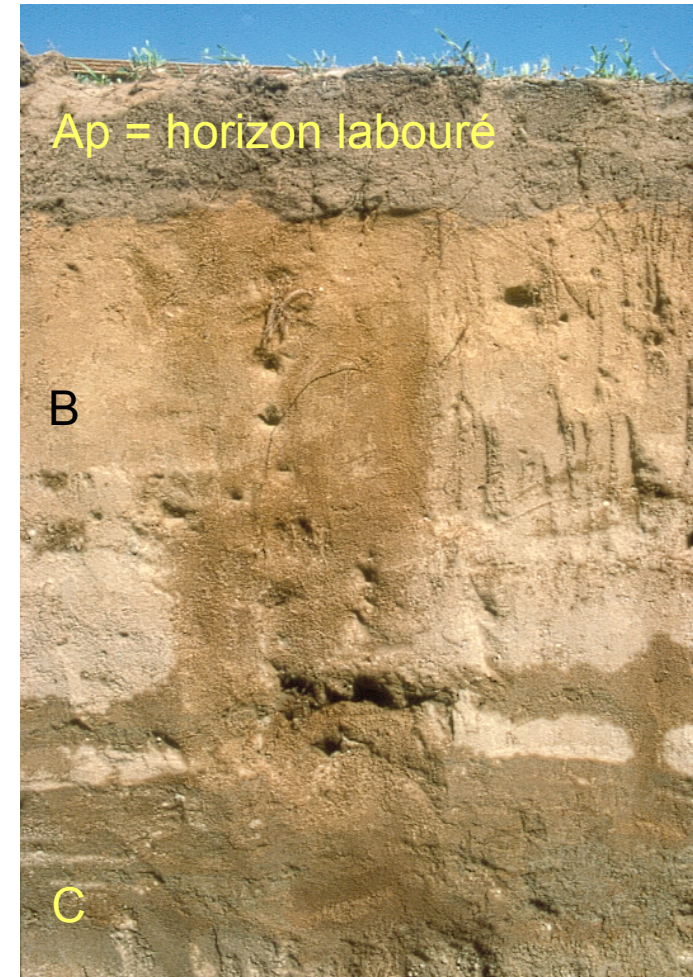
C : roche mère altérée

Le profil culturel

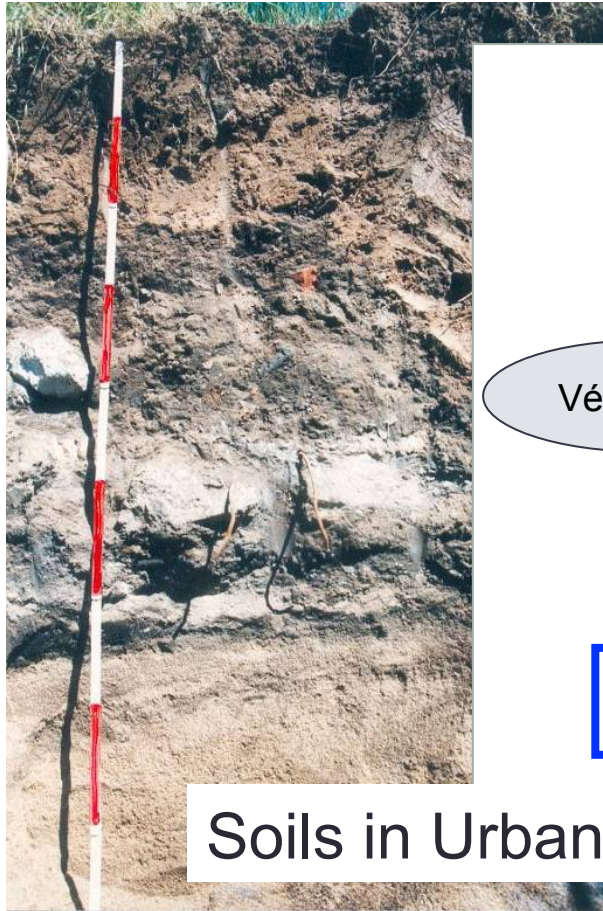
Souvent transformé
par l'Homme – sixième* facteur



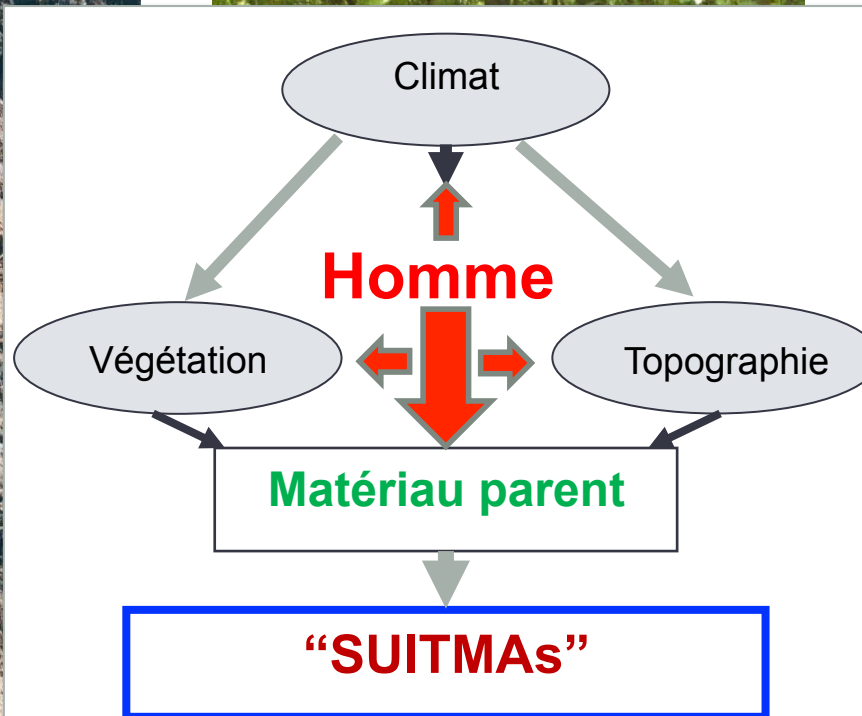
* Roche mère, climat, végétation, station, temps



La pédogenèse en milieu urbain



ancienne usine sidérurgique



sol urban scellé

Soils in Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas

Compactés
Pollués

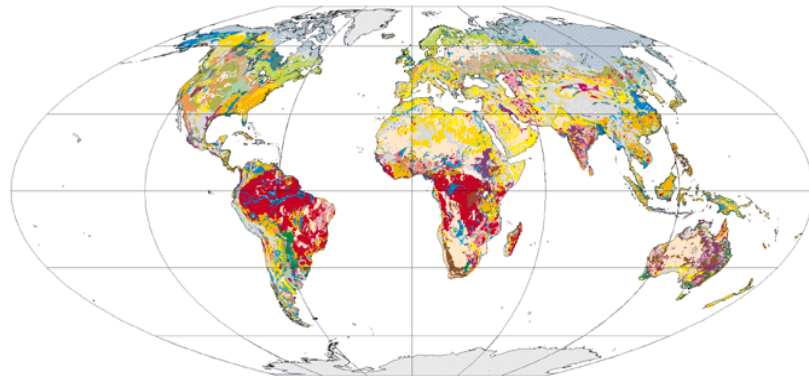
Technosol : Groupe de référence de la World Reference Base for Soil Resource (WRB, 2006)

1.3 – DIVERSITÉ DES SOLS

Les sols varient en fonction du climat,
des roches mères et de la topographie

DIVERSITE

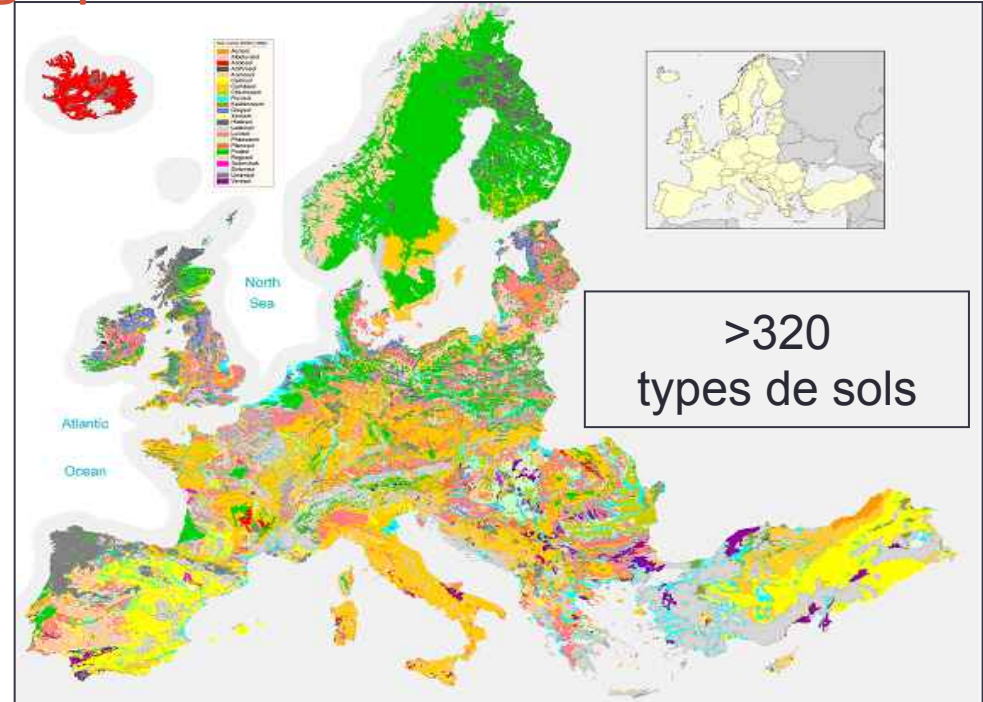
Distribution zonale



Albiluvisols	Chernozems	Durisol	Gypsisols	Luvisol	Phaeozems	Solonchaks	Glaciers
Acrisols	Calcisols	Fluvisols	Histosols	Lixisols	Planosols	Solonetz	No data
Andosols	Cambisols	Ferralsols	Kastanozems	Nitisols	Plinthosols	Umbrisols	Water b.
Arenosols	Cryosols	Gleysols	Leptosols	Podzols	Regosols	Vertisols	

Polar Quartic Projection

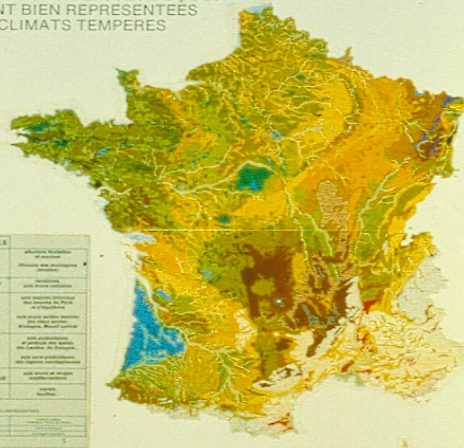
FAO-GIS, August 1999



>320
types de sols

LES SOLS DE FRANCE

PLUSIEURS CLASSES DE SOLS
SONT BIEN REPRESENTÉES
EN CLIMATS TEMPÉRÉS



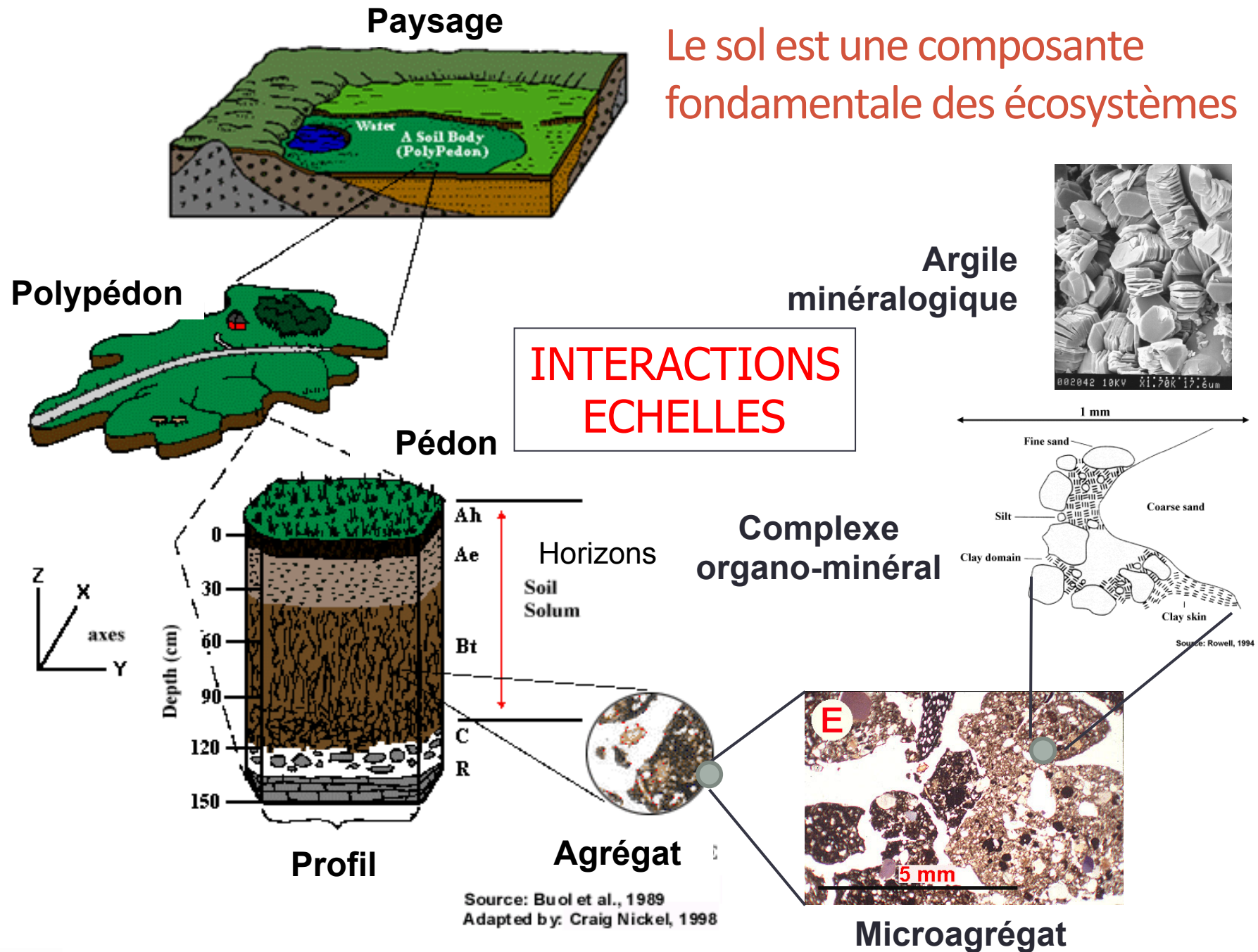
Héritage des
roches mères



Toposéquence



Le sol est une composante fondamentale des écosystèmes



1.4 – LES FONCTIONS DU SOL ET LES SERVICES RENDUS

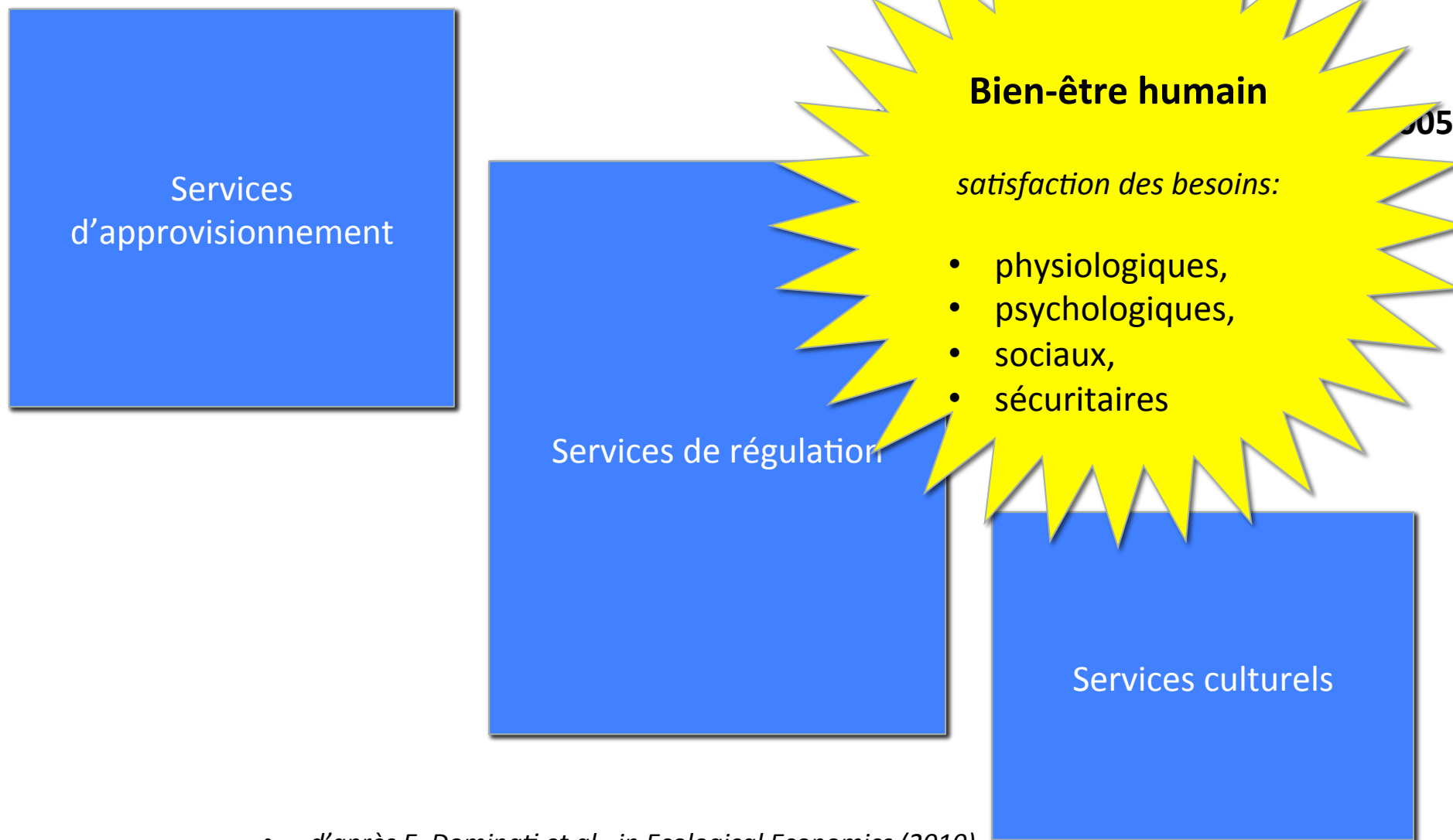
Les sols remplissent plusieurs fonctions vitales d'importance environnementale et socio-économique

- **Réservoir d'éléments nutritifs et support des racines**
 - production de biomasse (alimentaire et non alimentaire)
- **réservoir de biodiversité**
 - habitats, espèces et gènes
- **filtration, transformation des substances**
 - grands cycles -C, N, eau
 - éléments nutritifs, contaminants
- **stockage de substances**
 - C (réservoir majeur de C : 1,500 gigatonnes); P
- **source de matériaux bruts**
 - matériaux de construction
- **milieu physique pour les activités humaines**
 - habitat, transport, paysage
 - élimination des déchets, transport de l'énergie et de l'eau
- **archives géologiques et archéologiques**

RESSOURCE

Soil Framework Directive

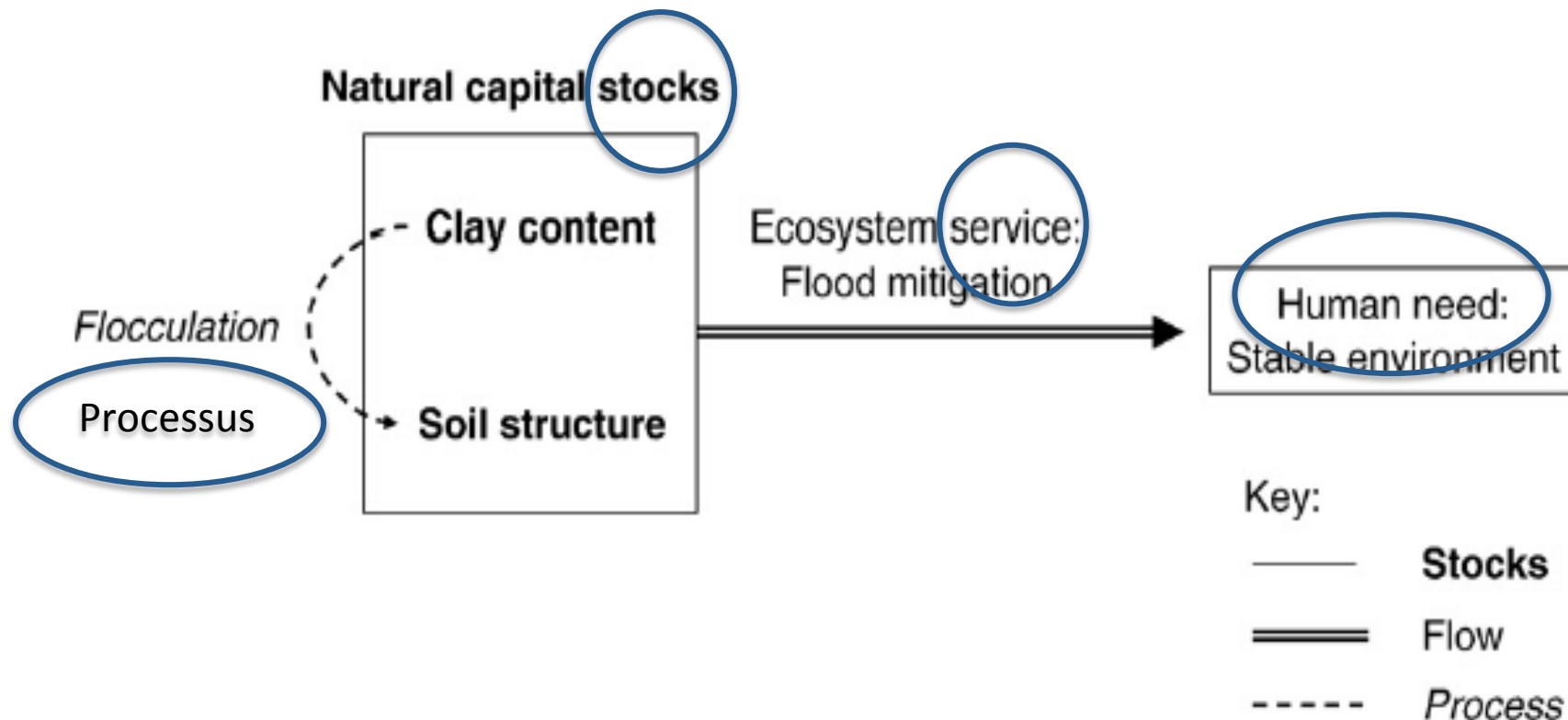
Les services écosystémiques rendus par les sols



- d'après E. Dominati et al., in *Ecological Economics* (2010)

Stocks, fonctions (processus) et services écosystémiques rendus par les sols

Exemple de la maîtrise du risque d'inondation

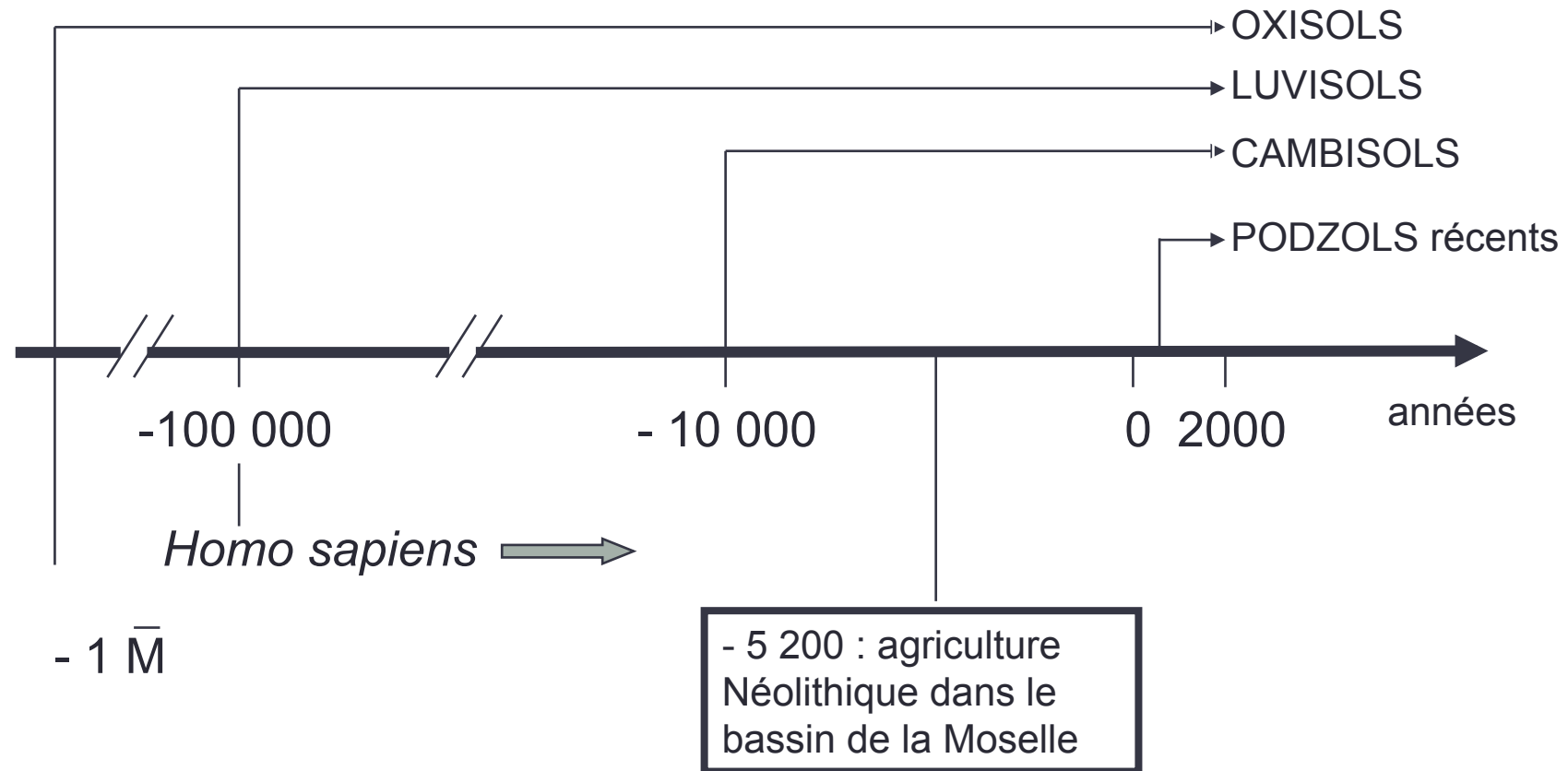


Dominati et al., 2010, Ecological Economics

2. LES ENJEUX DU SOL

2.1 – UNE RESSOURCE LIMITEE

La formation des sols naturels résulte de processus généralement longs



Une ressource non renouvelable à l'échelle humaine

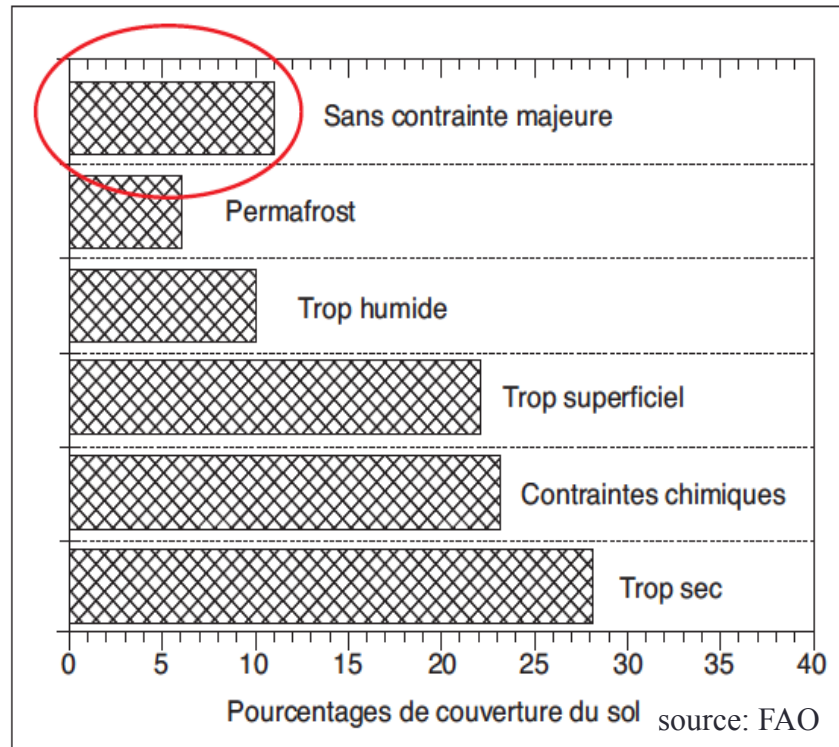
Pour une gestion durable des sols

First
**GLOBAL
SOIL
WEEK** | **SOILS
FOR
LIFE**



Let's talk about soil

En regard des besoins, la ressource en sols est limitée



Terres émergées : 148 940 000 km²

La dégradation des sols a un impact direct sur la qualité de l'eau et de l'air, la biodiversité et le changement climatique

Elle menace la santé et la sécurité alimentaire des citoyens

nb : « Human foot print » : 83% of the total Earth's surface

- Seuls 11% de la surface sont cultivables sans apports majeurs (engrais, énergie, eau)

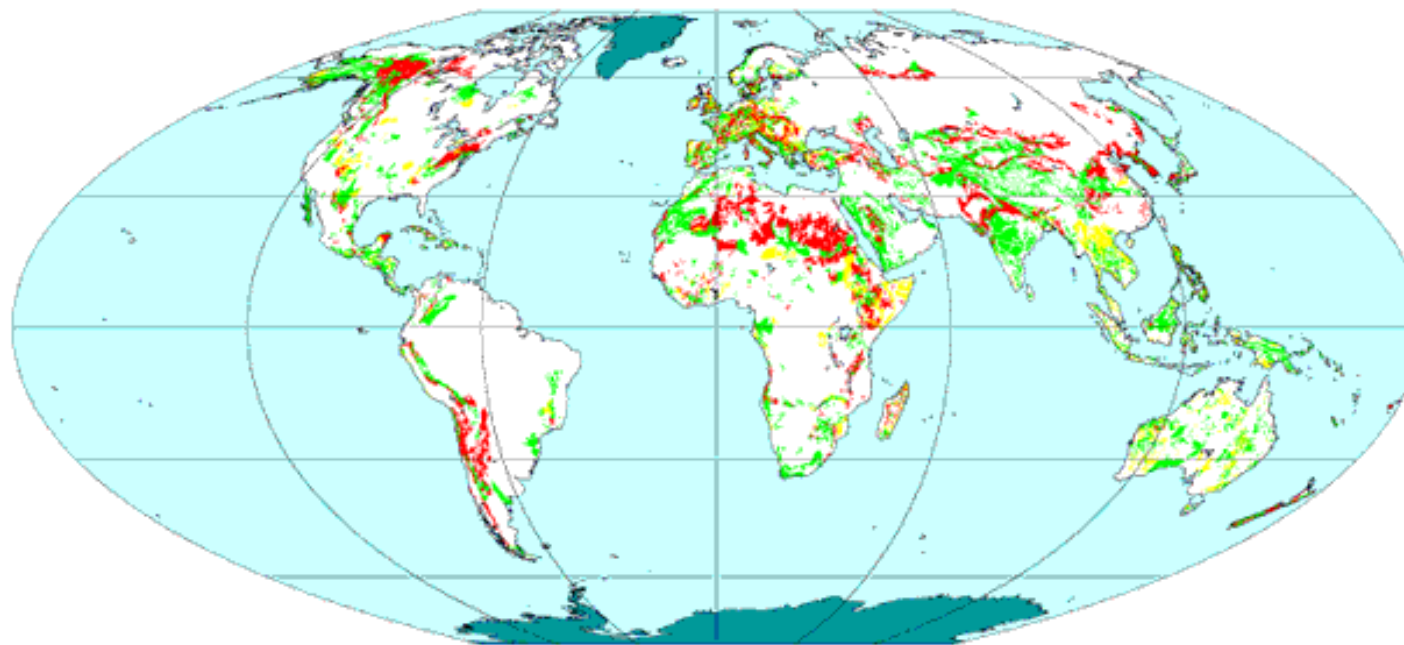


• Dégradation des sols

- Erosion
- Diminution de la matière organique
- Tassement
- Diminution de la biodiversité
- Glissements de terrain
- Salinisation
- Contaminations (locales et diffuses)
- Scellement/Imperméabilisation

Les sols fertiles sont inégalement distribués exemple des Cambisols – sols à haute fertilité

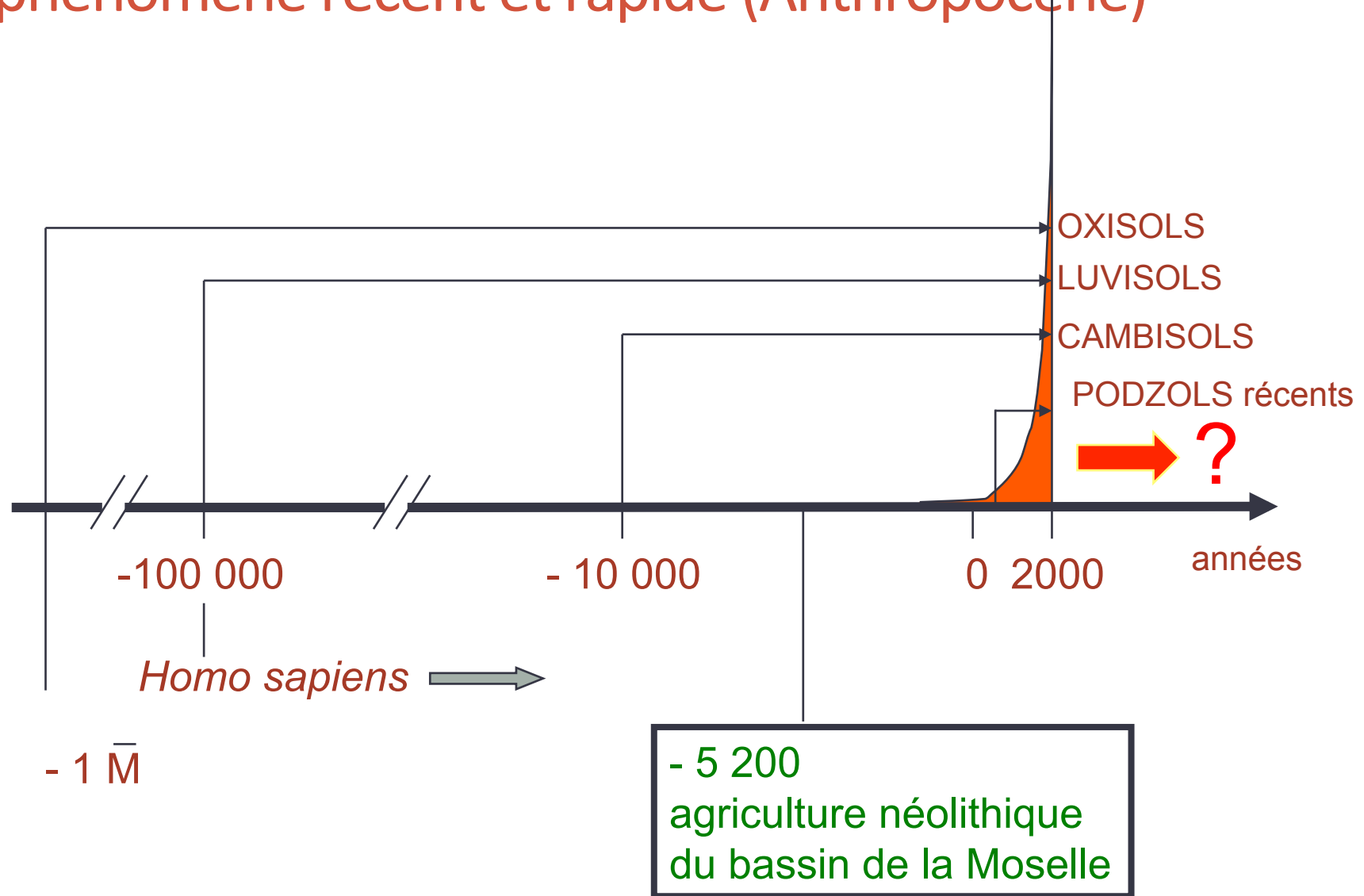
Distribution of CAMBISOLS
Based on WRB and the FAO/Unesco Soil Map of the World



Dominant **Associated** **Inclusions** **Miscellaneous lands**
(Inland waterbodies, Glaciers, No data)

FAO-GIS, February 1998

La dégradation anthropique des fonctions des sols: phénomène récent et rapide (Anthropocène)



Les enjeux globaux du 21^{ème} siècle

- **Accroissement de la population**
- **Changements climatiques**
- **Raréfaction des ressources naturelles (sol, sous-sol)**
- **Érosion de la biodiversité**
- **Contamination de l'environnement**
- **Urbanisation – artificialisation**

- **Exploration (installation) spatiale**

Pour chacun de ces enjeux le sol occupe une place centrale car c'est une composante fondamentale des écosystèmes terrestres

Erosion

Compaction

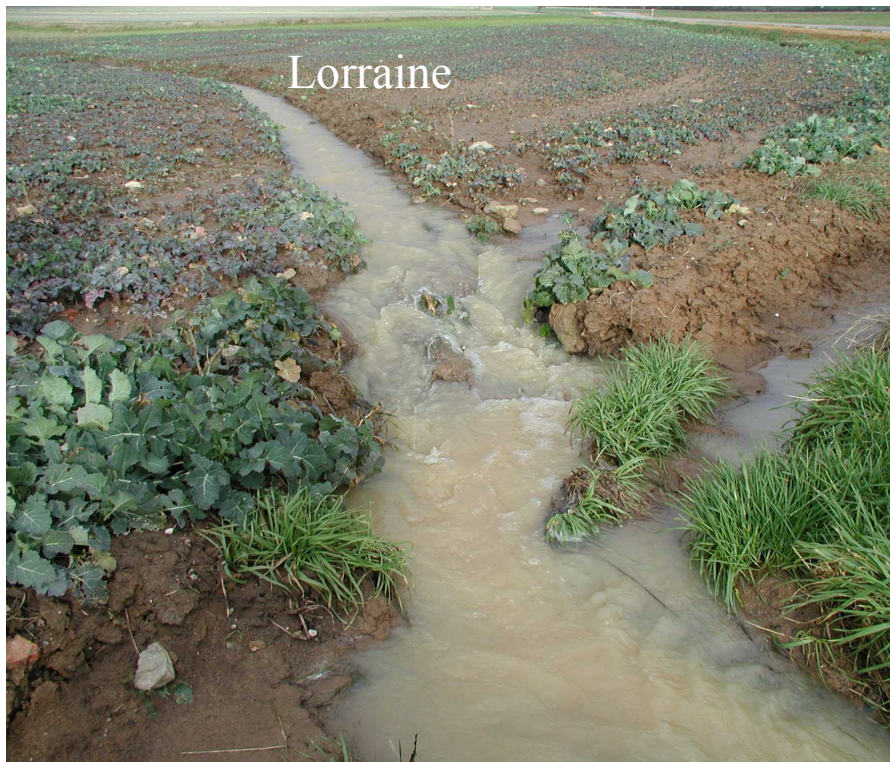
Diminution du taux de matière organique

Salinisation

Acidification

2.2 – DÉGRADATION DES SOLS

Erosion : phénomène d'intensité variable mais universel



Région méditerranéenne



Raisons de l'érosion agricole

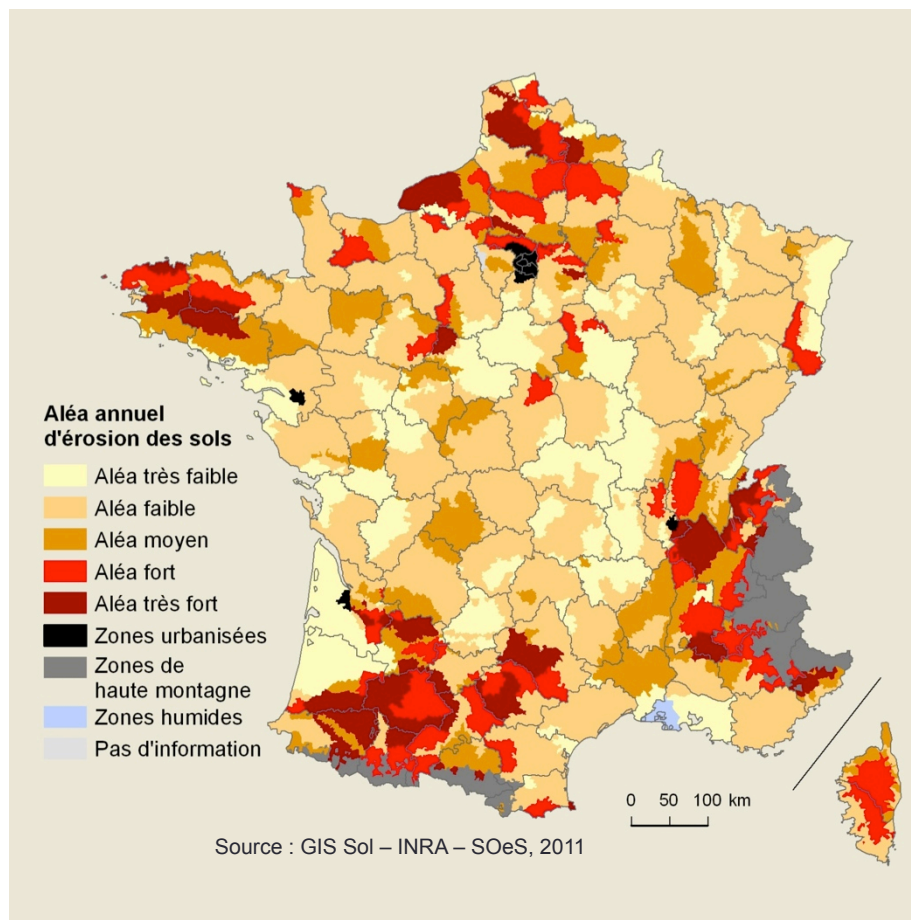
- **Sols nus**
- **Pente, pluies battantes**
- **Structure fragile**
 - Faible taux de matières organiques
 - Faible proportion d'argiles
 - Forte proportion de limons
 - Complexe absorbant désaturé

Les pierres « poussent »



Erosion en France

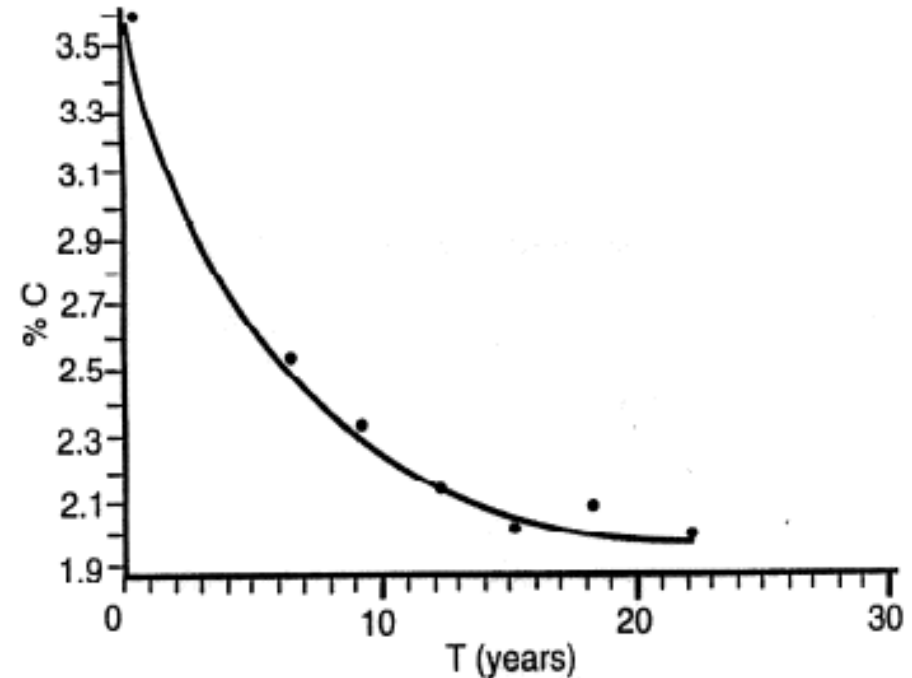
Enjeu majeur à long terme : au-delà d'une perte de 1t/ha/an
on perd plus de sol que la nature n'en forme!



- **Augmentation des événements extrêmes**
- **Importance du taux de couverture du sol, et du sens de travail du sol**
- **Importance des « barrières » à la connectivité des ruissellements (bandes enherbées)**
- **Importance de la gestion à l'échelle des petits bassins versants**

Diminution du taux de matière organique

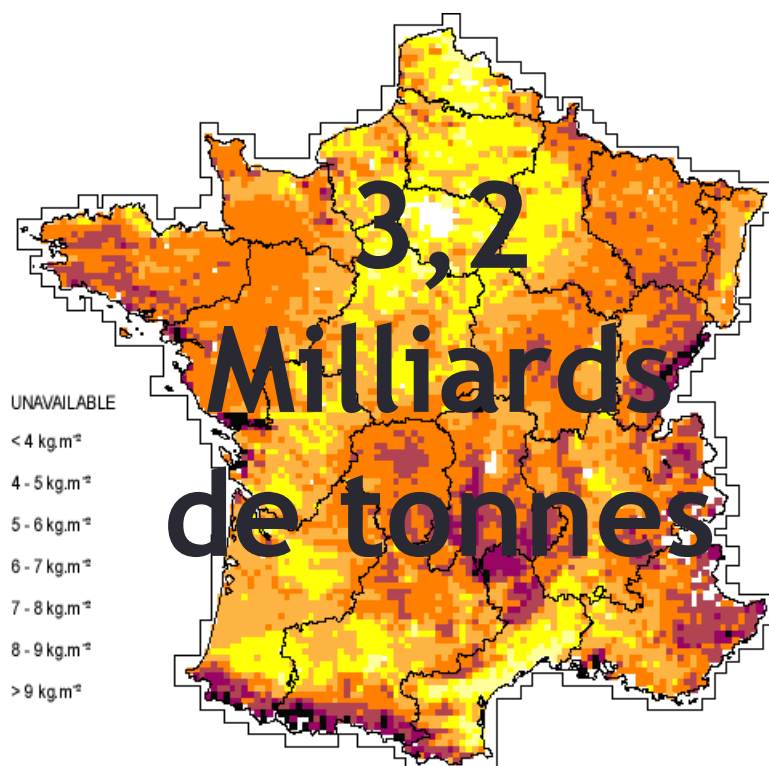
- **Conséquences :**
 - dégradation de la structure
 - érosion
 - perte de fertilité des sols
 - réserve nutritive, transport d'éléments nutritifs, activité des organismes, effets physiologiques,...
 - déstockage du C
- **Mise en culture : accélération de la minéralisation de la matière organique**
 - aération, exposition des matières organiques



Evolution du taux de carbone du sol d'une prairie après conversion en culture (Johnston, 1972)

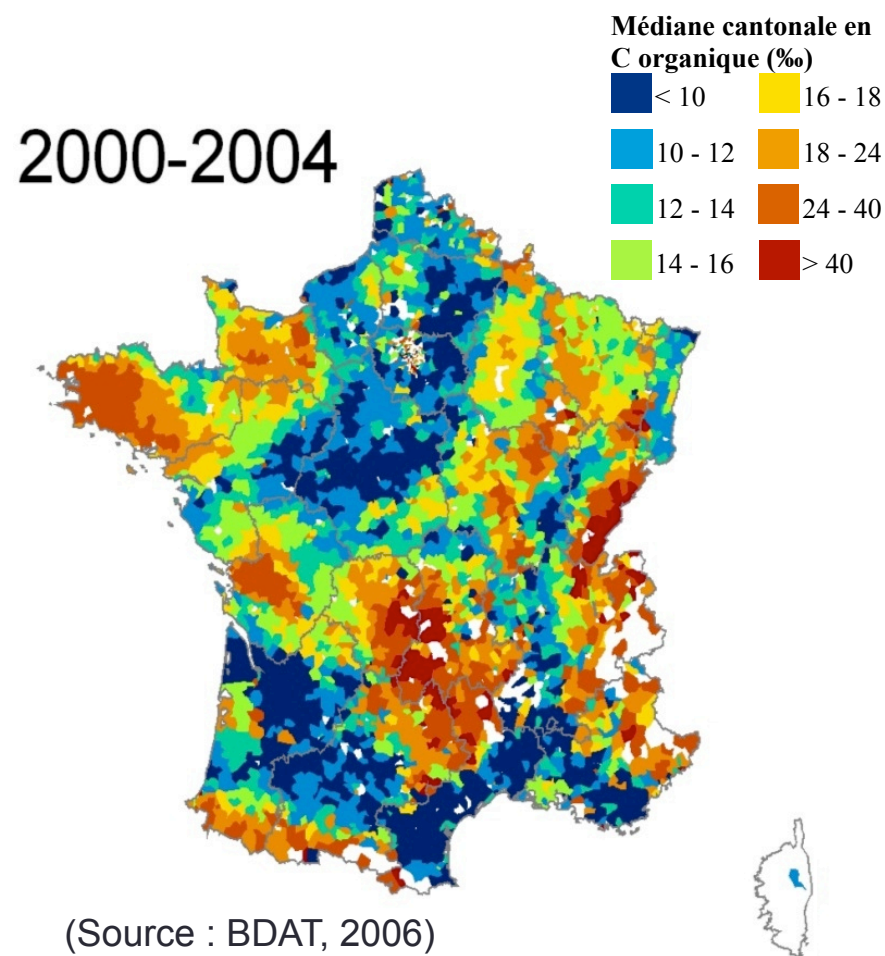
Diminution du taux de matière organique

Stocks de C
dans les sols de France (0-0.3 m)



Arrouays et al., 2001 Soil Use and Management,
Martin et al., 2010., Biogeosciences.

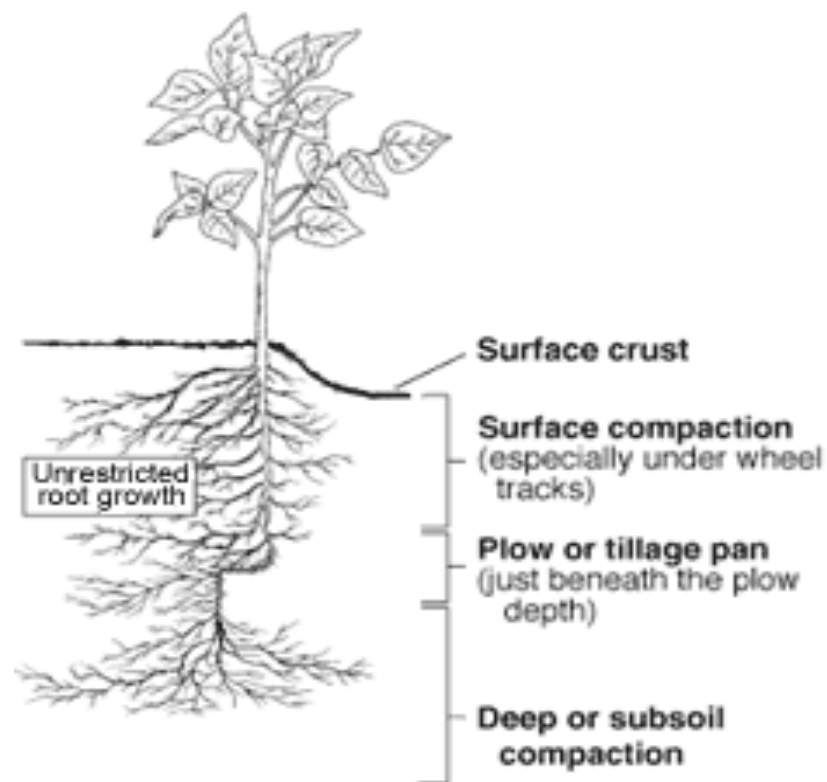
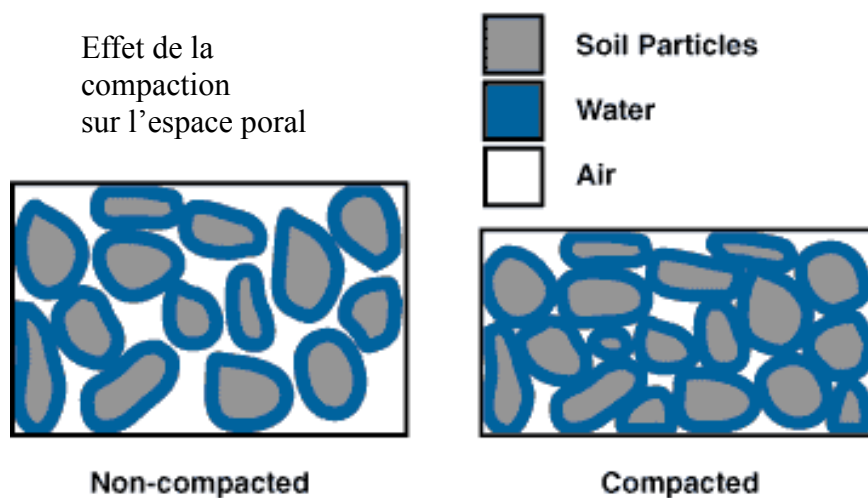
Tendance à la diminution du taux
de C dans les sols



Compaction



Modification de l'hydrodynamique
et de la croissance des plantes (racines)



Source: Compaction-Soil Management Series 2. University of Minnesota Extension Service, BU-7400

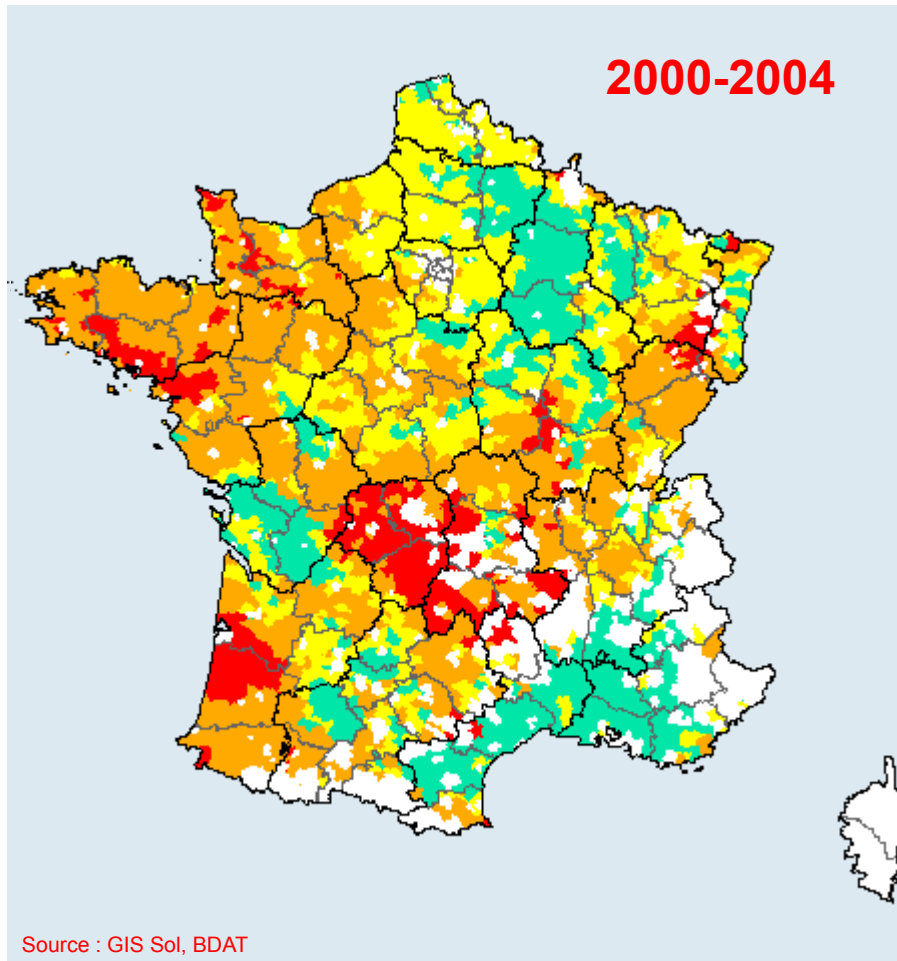
Salinisation

- **Climats arides**
- **Remontées capillaires**
 - suite à l'irrigation
 - suite à la mise en culture et la remontée consécutive du niveau de nappes salées
- **Autres origines : fond géochimique**
 - Sols salés de Lorraine (Château-Salins)
- **Conséquences**
 - phytotoxicité
 - dégradation de la structure (érosion)

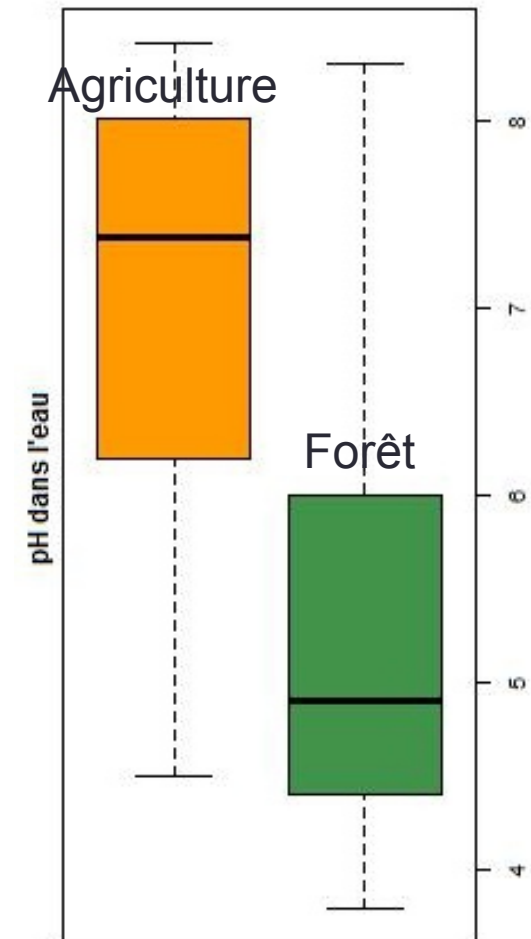


Croûtes superficielles; milieu sodique

Acidification : *médiane cantonale des pH des sols agricoles de France*



- Ne semble pas être un problème dans les sols cultivés
- A surveiller dans les prairies et forêts ainsi qu'en situation de semis direct (acidification possible des premiers cm du profil)



2.3 – CHANGEMENTS CLIMATIQUES

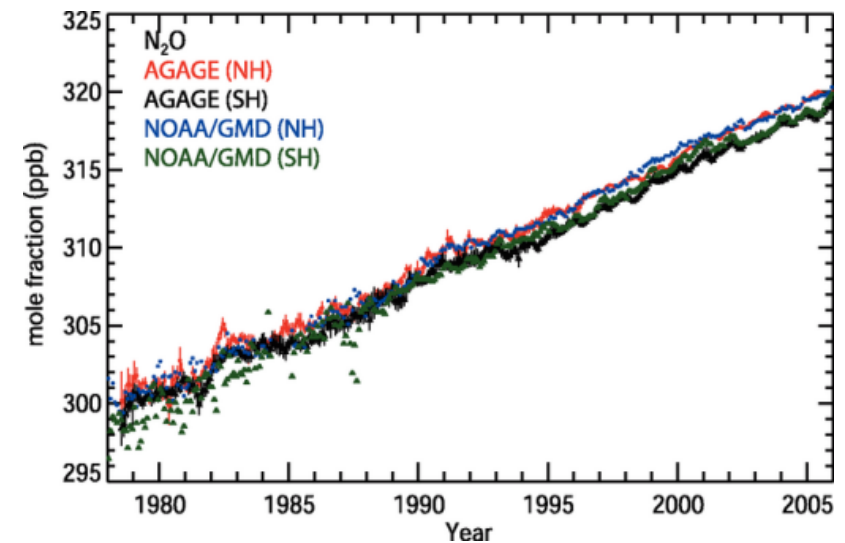
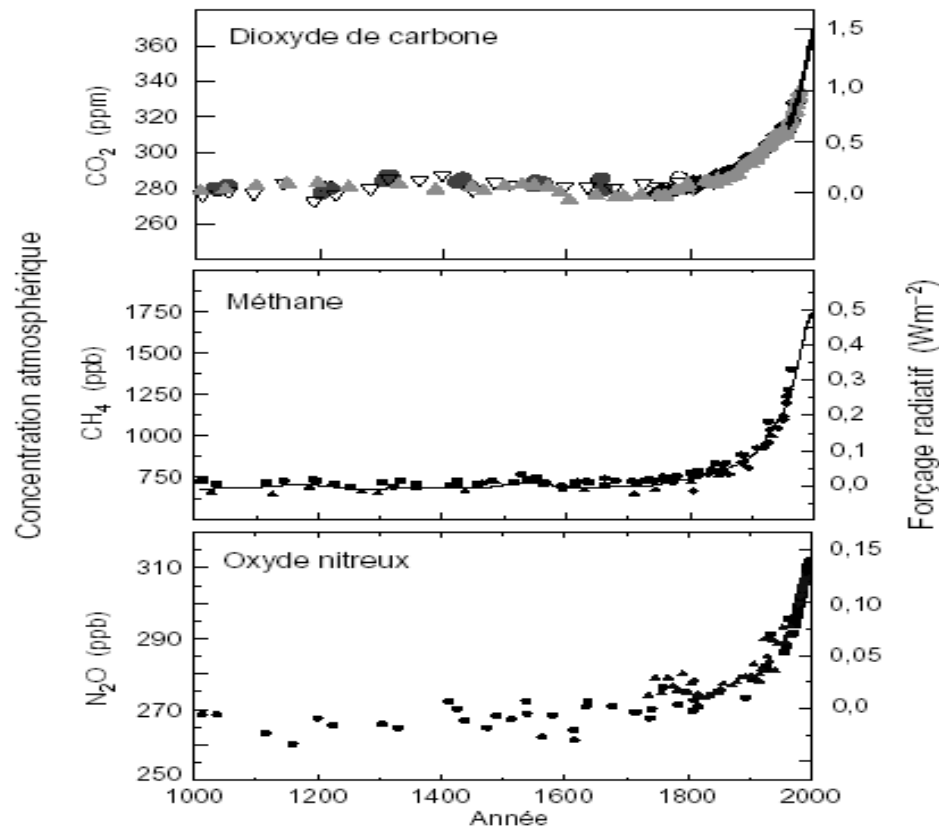
Changements climatiques

- **Evolution du climat**
 - température, précipitations
- **Augmentation de la fréquence des événements catastrophiques**
 - sécheresses, inondations, cyclones, pluies battantes, grêle
- **Hausse du niveau des mers**
 - territoire agricole
- **Contribution anthropique avérée**
 - gaz à effet de serre
 - CO₂, N₂O, CH₄
- **Rôle des sols**
 - régulation des flux de GES : source – puits
- **Impacts sur les sols**
 - accélération de la dégradation

Evolution des gaz à effet de serre dans l'atmosphère

Indicateurs de l'influence de l'homme sur l'atmosphère pendant l'ère industrielle

a) Concentrations atmosphériques globales de trois gaz à effet de serre bien mélangés

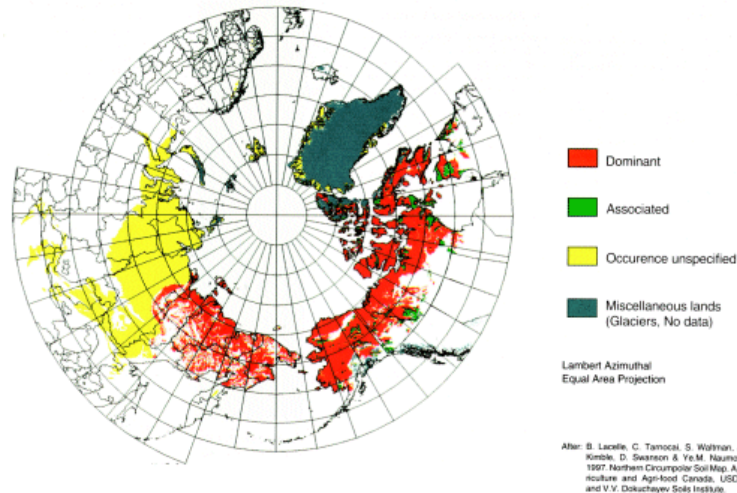
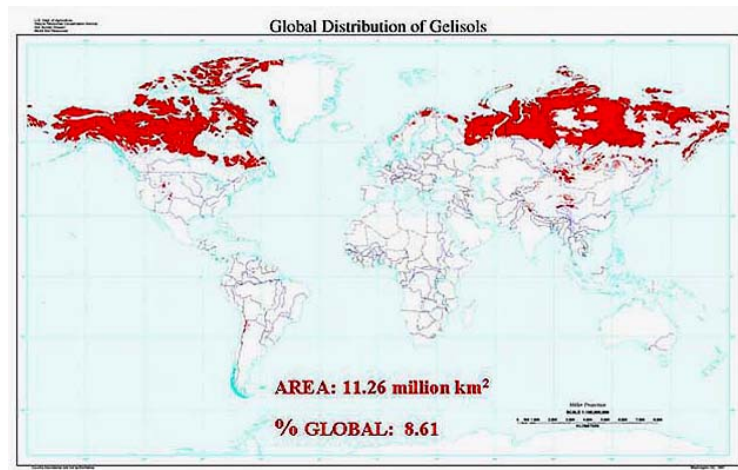


GAZ	Contribution à l'effet de serre
CO ₂	1
CH ₄	23
N ₂ O	296

Sources de N₂O (Tg N-N₂O an⁻¹) (IPCC* 2007)

AR4 (2007)		
SOURCE	value	range
Anthropogenic sources		
Fossil fuel combustion and Industrial processes	0.7	0.2-1.8
Agriculture	2.8	1.7-4.8
Rivers, estuaries, coastal zones	1.7	0.5-2.9
Biomass and biofuel burning	0.7	0.2-1.0
Human excreta	0.2	0.1-0.3
Atmospheric deposition	0.6	0.3-0.9
Anthropogenic total	6.7	
Natural sources		
Soils under natural vegetation	6.6	3.3-9.0
Oceans	3.8	1.8-5.8
Atmospheric chemistry	0.6	0.3-1.2
Natural sources total	11	
Total sources	17.7	8.5-27.7
Atmospheric sink	12.3	
Atmospheric increase	3.9	
Unbalanced	1.5 ???	large range

Emissions de GES : importance des Cryosols* dans le cycle global du carbone



- **Au moins 50% du carbone organique global**
 - 1700 Gt de C organique dans les 3 premiers m
- **Les températures de l'atmosphère arctique ont augmenté de +3°C durant les dernières décennies**
 - réchauffement qui entraîne la libération du C stocké dans le permafrost
- **Les sols polaires et le permafrost sont une source majeure de GES (CH₄, N₂O, CO₂)**

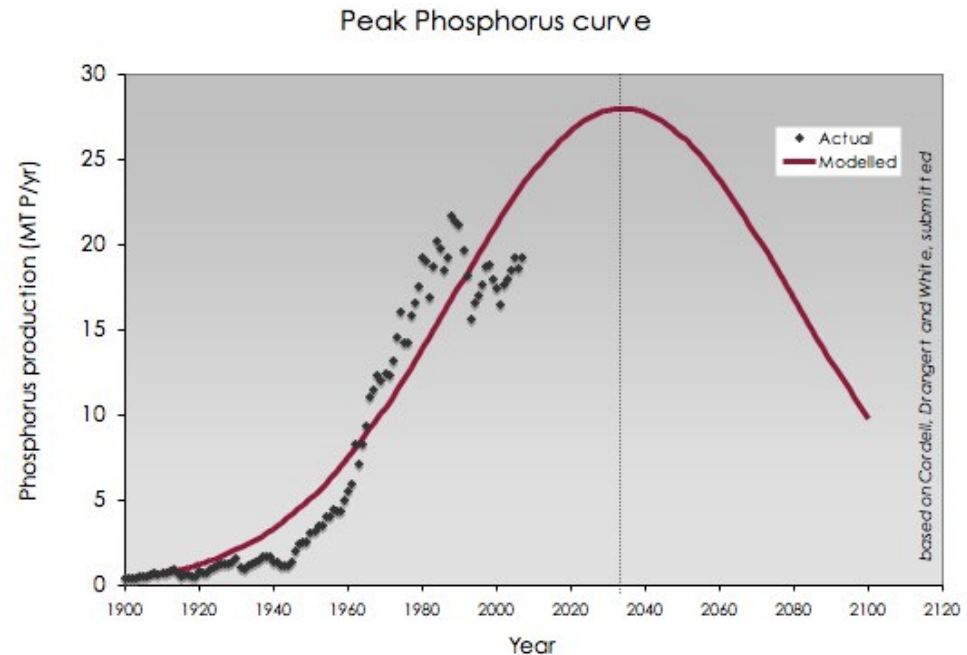
2.4 – RARÉFACTION DES RESSOURCES

Pic du phosphore

- **P élément clé de la vie**
- **non renouvelable**
- **Pic de production proche**
 - Cordell, 2009; Craswell et al., 2010; White et Cordell, 2010

Consommation actuelle d'environ 22,5kg/an de phosphate minéral par personne.

Soit 50 fois plus que la quantité journalière recommandée (1.2 g/ personne) (Cordell, Drangert and White, soumis).



Gestion durable de la fertilité des sols

- Lois de l'entretien

Recyclage des déchets

- Retour au sol

Nouvelles fonctionnalités de l'agriculture

- Phytomine des ressources minérales (P et autres éléments)

Recyclage des déchets en agriculture (France)

- 330 10⁶ t matières fraîches recyclées chaque année (agriculture, industries, villes)
- 11 t fumiers et assimilés /ha/an (surface totale cultivée 30 10⁶ ha)
- Seulement 47% de la surface totale est concernée



Nécessité du recyclage des éléments

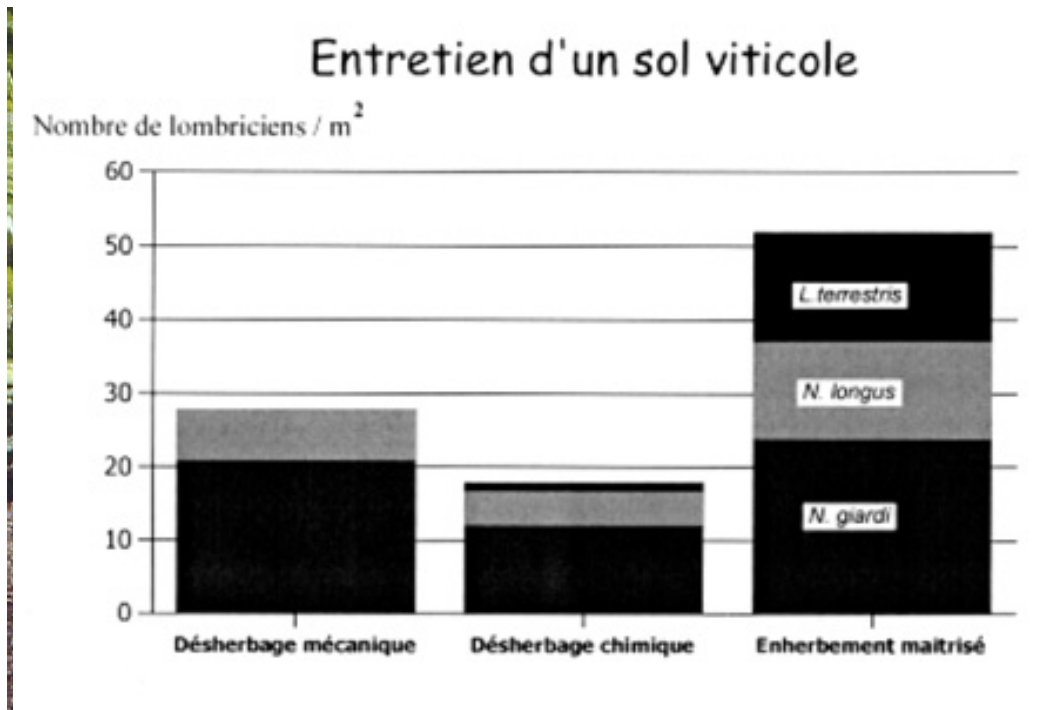
- Mais risque d'introduction de substances polluantes



Pression importante sur les sols cultivés

2.5 – ÉROSION DE LA BIODIVERSITÉ

Evolution de la biodiversité tellurique faune du sol – ex : vers de terre

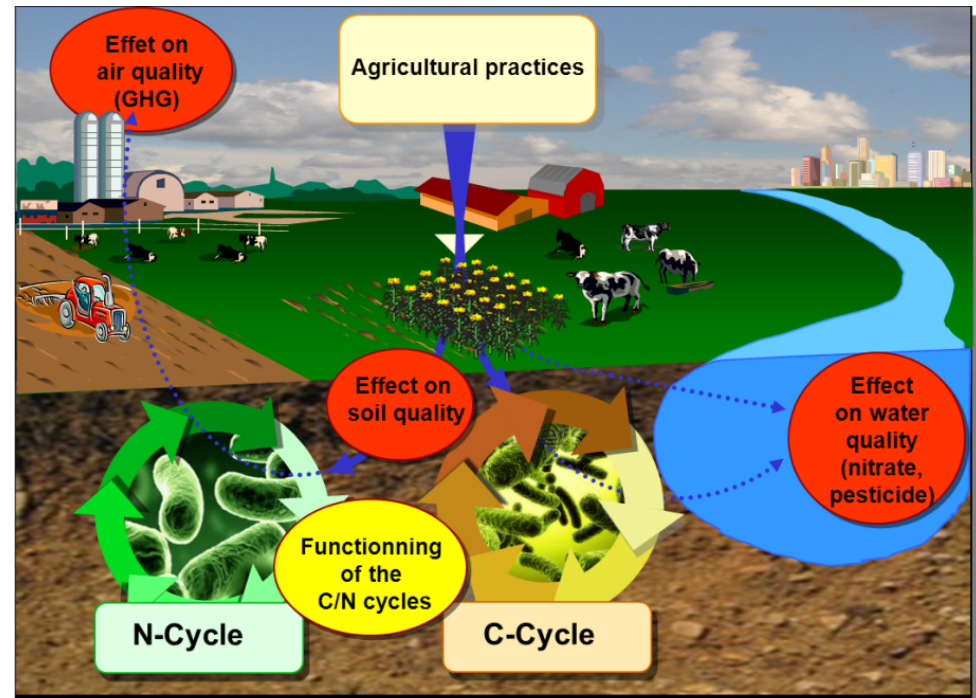


50 kg ha⁻¹ sous culture
1750 kg ha⁻¹ en bordure de champ ¹

Rôle des communautés microbiennes dans les sols

Fonctionnement du sol et des agrosystèmes

Utiliser les communautés microbiennes pour optimiser le fonctionnement du sol



- **Cycle de l'N**
 - Régulation des émissions de GES (N_2O)
 - Recyclage de l'N, élément majeur de la nutrition des plantes
 - Rôle dans la contamination des eaux par le nitrate
- **Cycle du C**
 - Décomposition de la matière organique
 - Séquestration du C pour réduire les émissions de CO_2
 - Dégradation des polluants organiques

2.6 – CONTAMINATION DE L'ENVIRONNEMENT

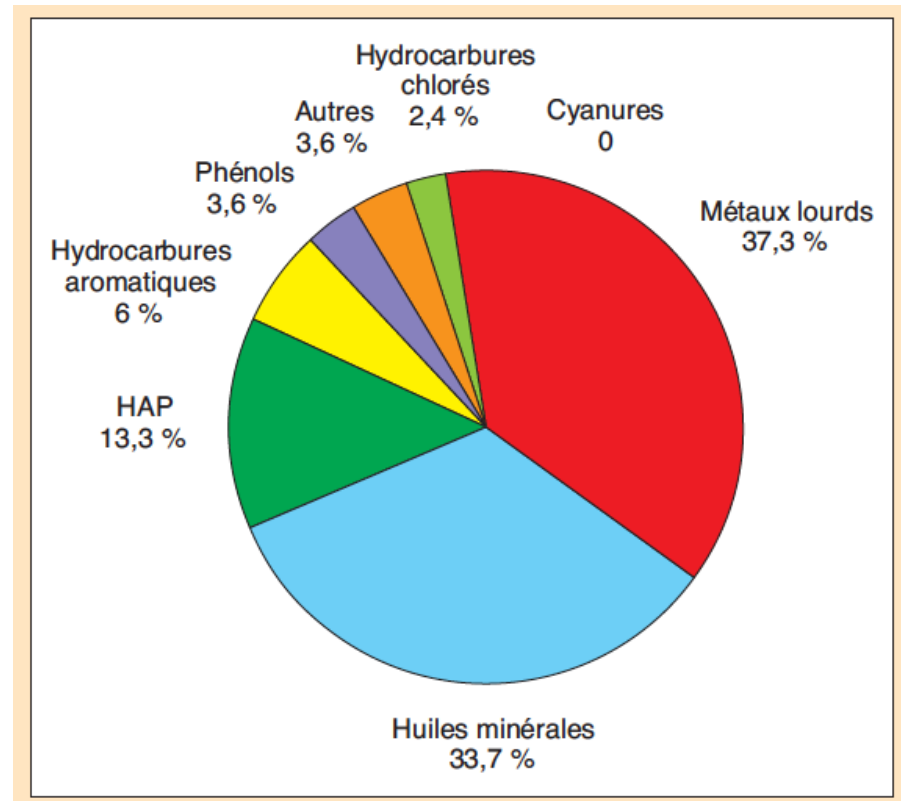
Les polluants des sols

- **Polluants organiques**

- Phytosanitaires
- Produits pharmaceutiques
- Hydrocarbures
 - gasoil, kérosène, etc.
- HAP, BTEX, PCB, solvants chlorés

- **Polluants inorganiques**

- Métaux : Cu, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Zn - Cd, Hg, Pb...
- Non-métaux : B, Se, As
- Radionucléides : Am, Cs, Nb, Ni, Np, Pu, Sr, Tc, U...



Source : Agence Européenne de l'Environnement

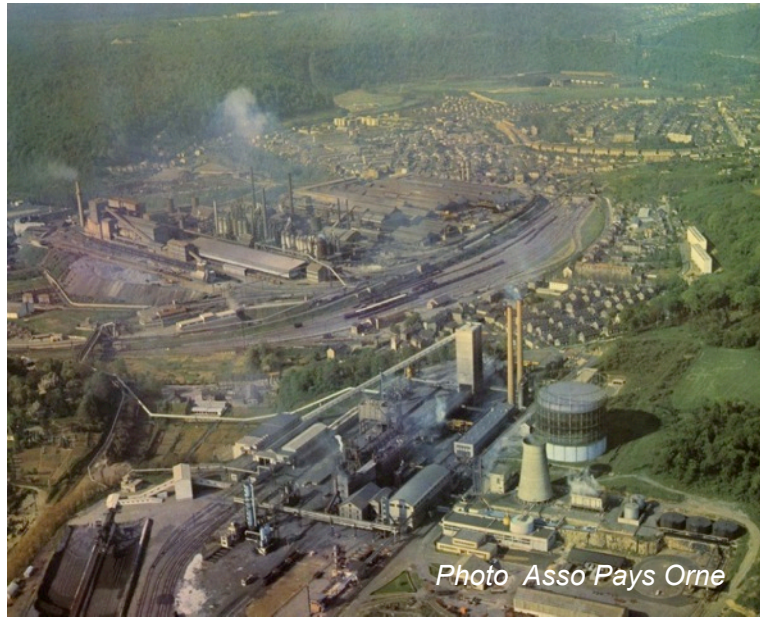
Pollution localisée:
ex: sol pollué par des goudrons de houille



sol d'une ancienne usine à gaz

d'après Wehrer et al., 2010

Pollutions localisées: friches industrielles



Technosols

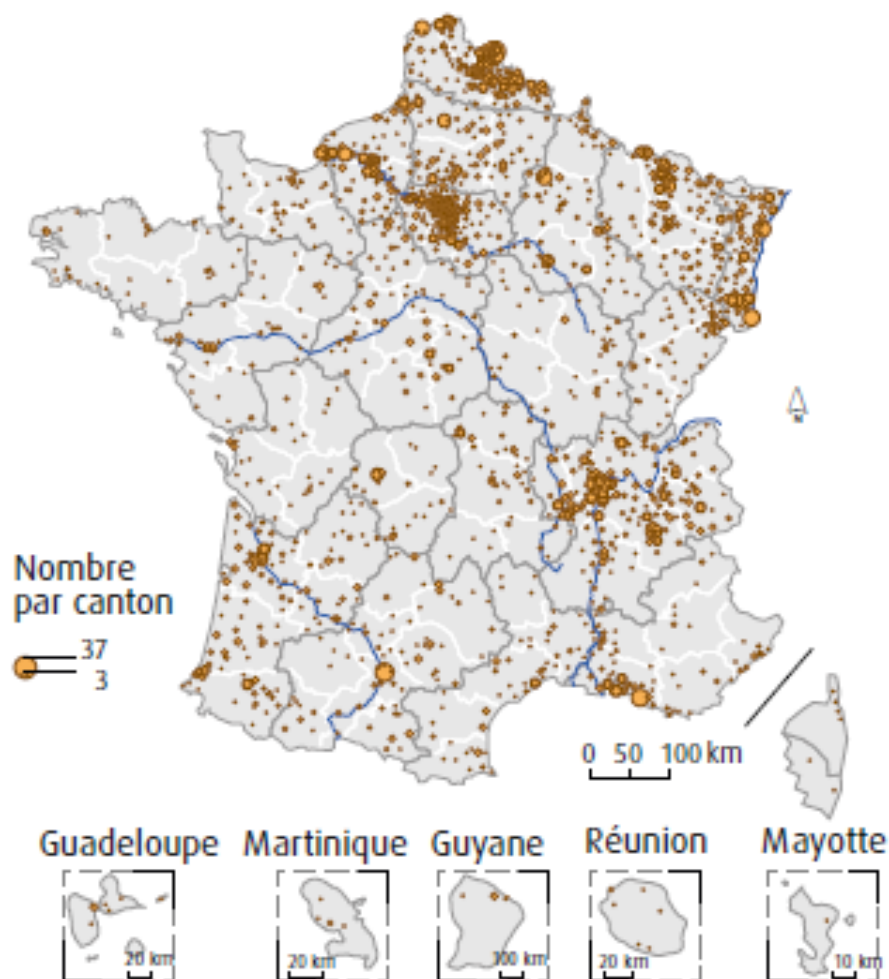
- *Matériaux technologiques*
- *Hétérogénéité*
- *Compaction*
- ***Pollutions***



Nécessité de dépolluer et restaurer les fonctions des sols

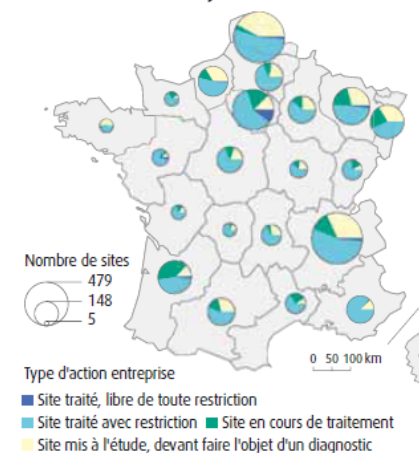


Sites et sols pollués en France



Source : Medde, DGPR (Basol au 16 janvier 2012), 2012. Traitements : SOeS, 2012.

Actions entreprises sur les sites pollués
au 16 janvier 2012



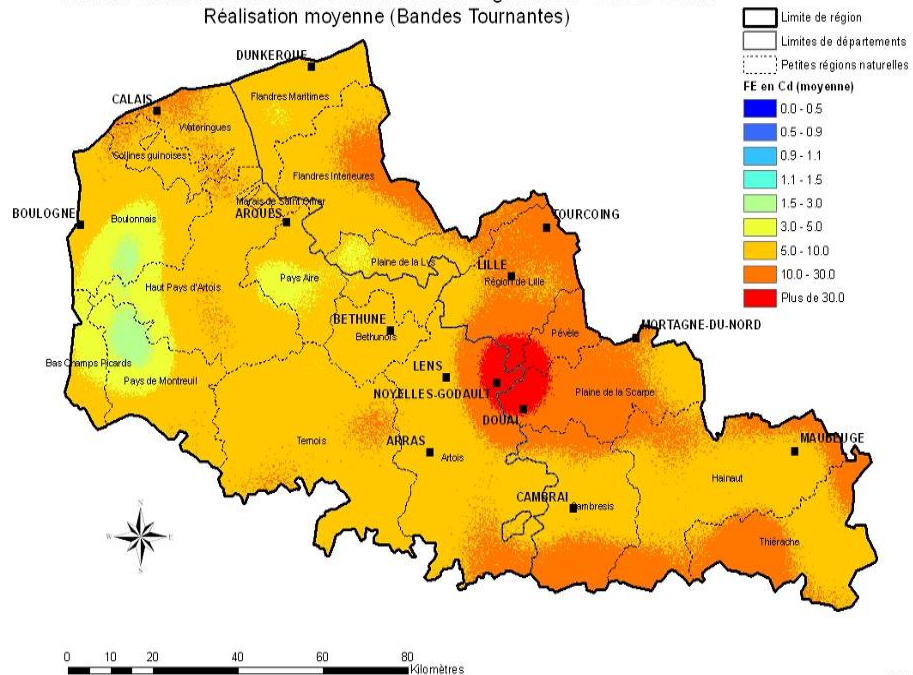
Bases de données :

- **Basias** : sites ayant accueilli une activité industrielle ou de service
257 000 sites en 2012
- **Basol** : **4100** sites ont fait l'objet de mesures de gestion
- Lorraine : 355 sites répertoriés
6,04% du total national

Contaminations diffuses : éléments en traces

Teneurs totales en cadmium dans les sols

Facteurs d'enrichissement en Cadmium dans la région Nord - Pas de Calais
Réalisation moyenne (Bandes Tournantes)



- Usines métallurgiques (Zn, Pb, Cd)
- >10 000 km² contaminés par Cd, Pb, Zn
- Contamination de la chaîne alimentaire

Mais aussi des risques de carence: cas du cuivre

Risque de carence en cuivre

- ★ prélèvement impossible
- aucun risque
- risque faible
- risque important

Source : GIS Sol, RMGS, 2011

0 50 100 km

Conséquences des pollutions diffuses : *ex: activité minière*



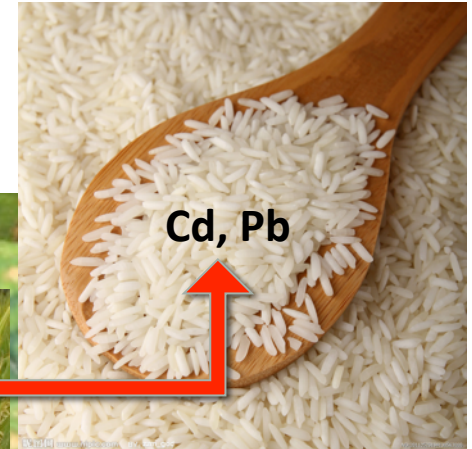
Irrigation par les eaux polluées



Contamination du riz



Sol stérile



Cd, Pb

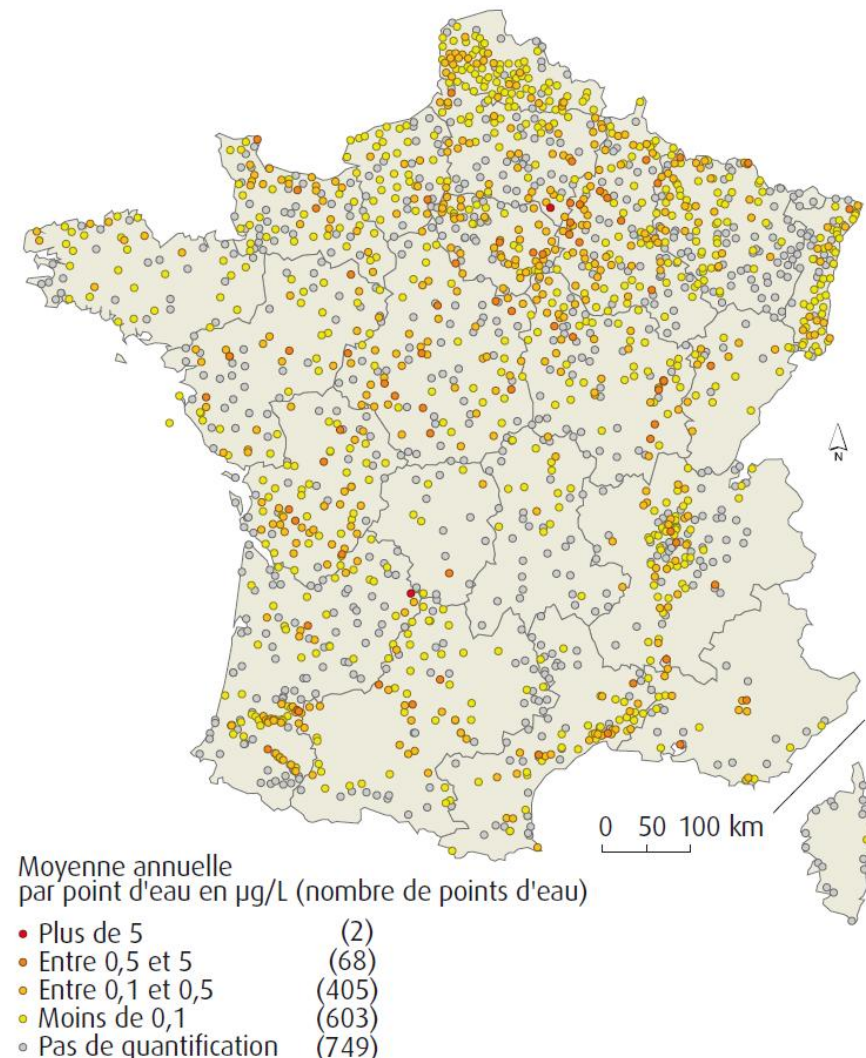


Phytotoxicité :
chlorose induite

Transfert des métaux lourds (Pb, Cd, Zn)
dans les écosystèmes et la chaîne alimentaire

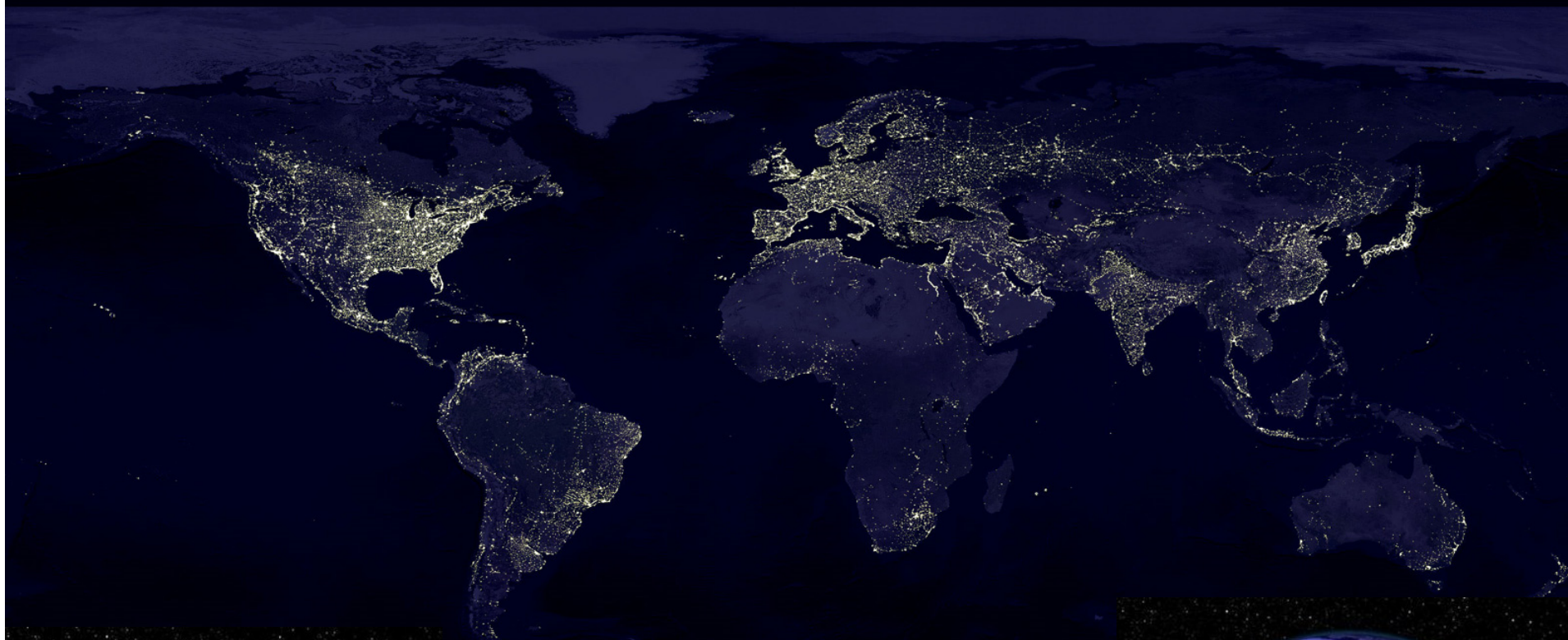
Contamination des eaux par les pesticides en France (IFEN, 2007)

- **91% des eaux de surface et 57% des eaux souterraines sont contaminées au moins une fois par an**
- **Exemple de pollution:**
 - 1,0 kg/ha de pesticide
 - 100 mm ruissellement annuel
 - Si contamination de :
 - 0,1 µg/l = perte de 0,1 g/ha (0,01% de l'apport)
 - 2,0 µg/l = perte de 2 g/ha (1% de l'apport)

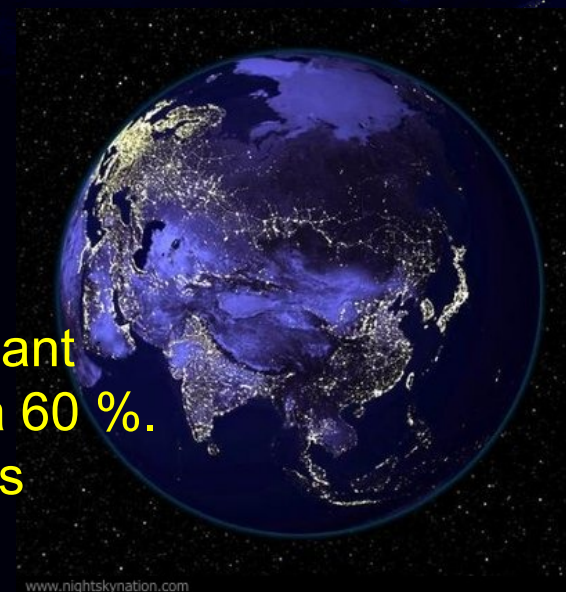


2.7 – URBANISATION - IMPERMÉABILISATION

La Terre pendant la nuit



- La moitié de la population mondiale vit maintenant dans les villes et, d'ici 2030, cette part atteindra 60 %.
- 20 méga-cités de plus de 10 millions d'habitants



Les sols scellés



Le scellement modifie les flux des fluides dans la ville

- Assurent essentiellement des fonctions de support des activités humaines
- Fonctions de production de biomasse quasi-inexistantes
- Fonctions de filtre réduites
- Biodiversité faible



Canalisations et câbles enterrés

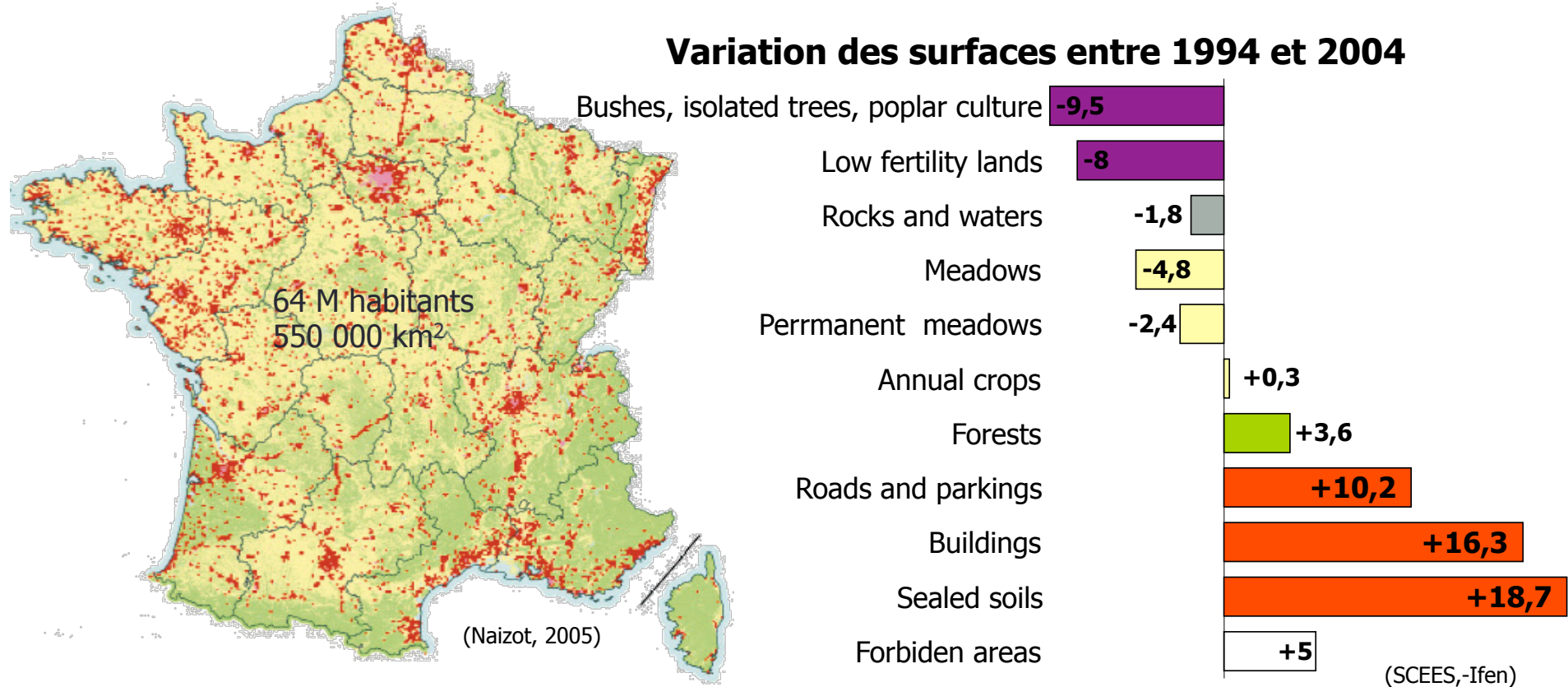


Conséquences de l'urbanisation :
perte irréversible de terres agricoles



Sud-Ouest de Paris

Artificialisation : développement urbain et perte de territoire agricole



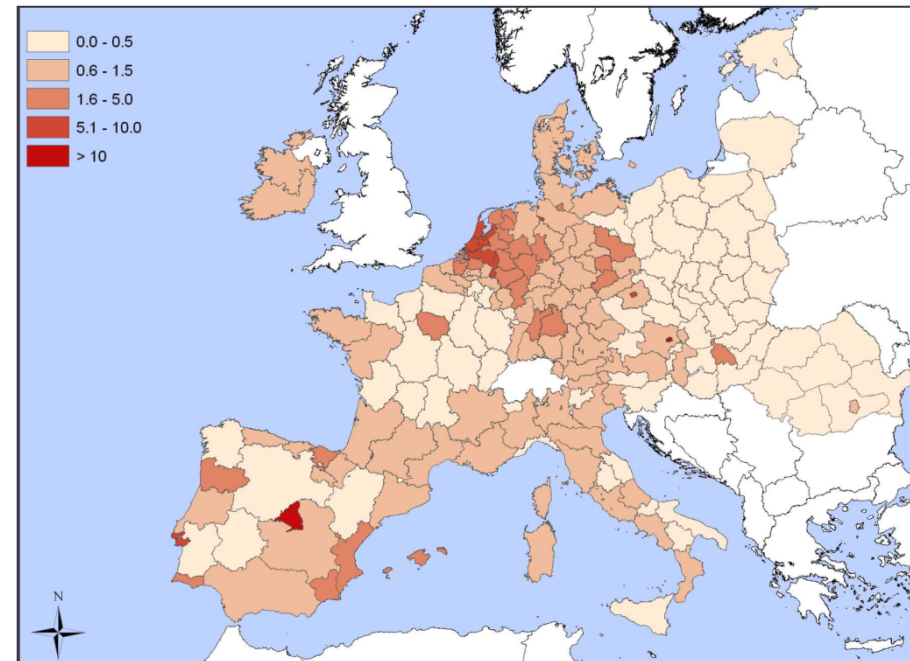
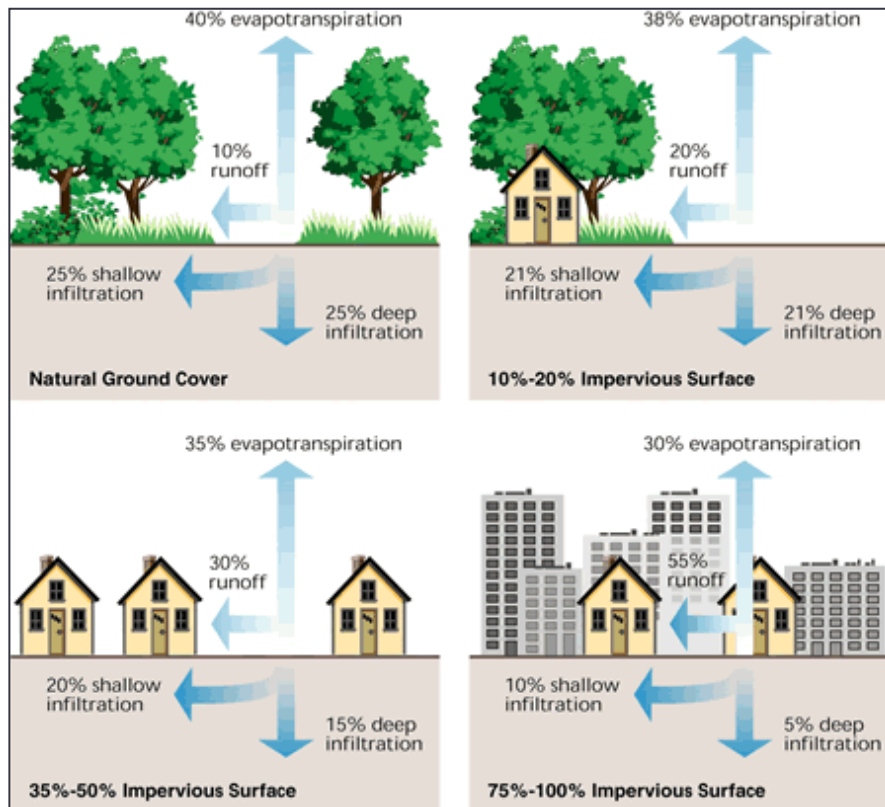
Chiffres en Europe :

- 78% : augmentation de la surface urbaine
- 90% aux dépens des terres agricoles (terres fertiles)
- 2,3% de l'Europe est scellée (200m² par citoyen; plus de 5% en Allemagne)
- 250 ha disparaissent chaque jour (2000-2006)

Conséquences de l'imperméabilisation des sols

Diminution de l'infiltration de l'eau

*Pertes de production de blé en UE (%)
(1990-2006)*



EUROPEAN COMMISSION COM(2012) 46

1990-2006 : perte (19 Etats membres) d'un potentiel de production agricole équivalent à 6,1 10⁶ t blé

copyright © 2007. Arizona Board of Regents

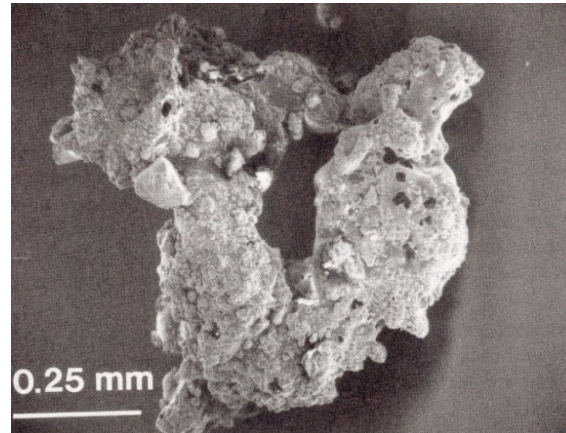
2.8 – EXPLORATION (INSTALLATION) SPATIALE

Exploration (installation) spatiale



**LUNAR BASE
AGRICULTURE**
SOILS FOR PLANT GROWTH

- Pédogenèse ?
- Potentiel agronomique ?
- Quels scénarios ?
 - Hypothèses construites à partir d'échantillons et observations des missions spatiales
 - Apollo
 - Mars



Régolithe
lunaire

La qualité des sols : une préoccupation récente en Europe

**« Nous plaçons
désormais la
protection des sols
au même plan que
l'épuration de l'air
et de nos ressources
en eau »**

**Margot Walström
Commissaire européenne chargée de
l'environnement
le 19 avril 2002**



Directive européenne (2007) : Stratégie européenne en faveur de la protection des sols

- **Etat des lieux :**

- **Dégradation : 3,5 millions de sites; 0,5 M contaminés**

- activités agricoles et sylvicoles, industrielles, tourisme, expansion urbaine, grands travaux
 - perturbation des fonctions fondamentales des sols
 - production et qualité des aliments, qualité de l'eau, de l'air, biodiversité, santé, changement climatique.
 - érosion (16%), glissements de terrain, tassement, salinisation, diminution des teneurs en matière organique (45%), imperméabilisation, contamination (3,5 M sites).

- **Changement d'utilisation des sols : +2,8% en 10 ans**

- **Coûts liés à la dégradation des sols généralement supportés par la Société :
> € 38 milliards par an (hors érosion)**

- **Directive européenne**

- **Connaissance de la ressource en sols**
 - **Garantir l'utilisation durable du sol**
 - **Agir**

<http://ec.europa.eu/environment/soil/index.htm>

Conclusion

- **Formation des sols :**
 - Processus variés en fonction des conditions de milieu
 - Large diversité des sols
 - Temps de formation généralement longs
- **Ressource non renouvelable**
 - Fragile, à forts enjeux (alimentation, eaux, climat, biodiversité...)
 - **Protection des sols :**
 - Préoccupation récente (2002) mais non finalisée en Europe (Directive européenne)
- **Besoins d'une gestion durable et d'une ingénierie des sols**
 - **Evolution de la stratégie européenne**
 - Prise en compte des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols
 - **Connaissance du sol**
 - **Intégration de la protection des sols à tous les niveaux**
 - **Besoins de protection, de restauration des sols et de valorisation de la ressource**