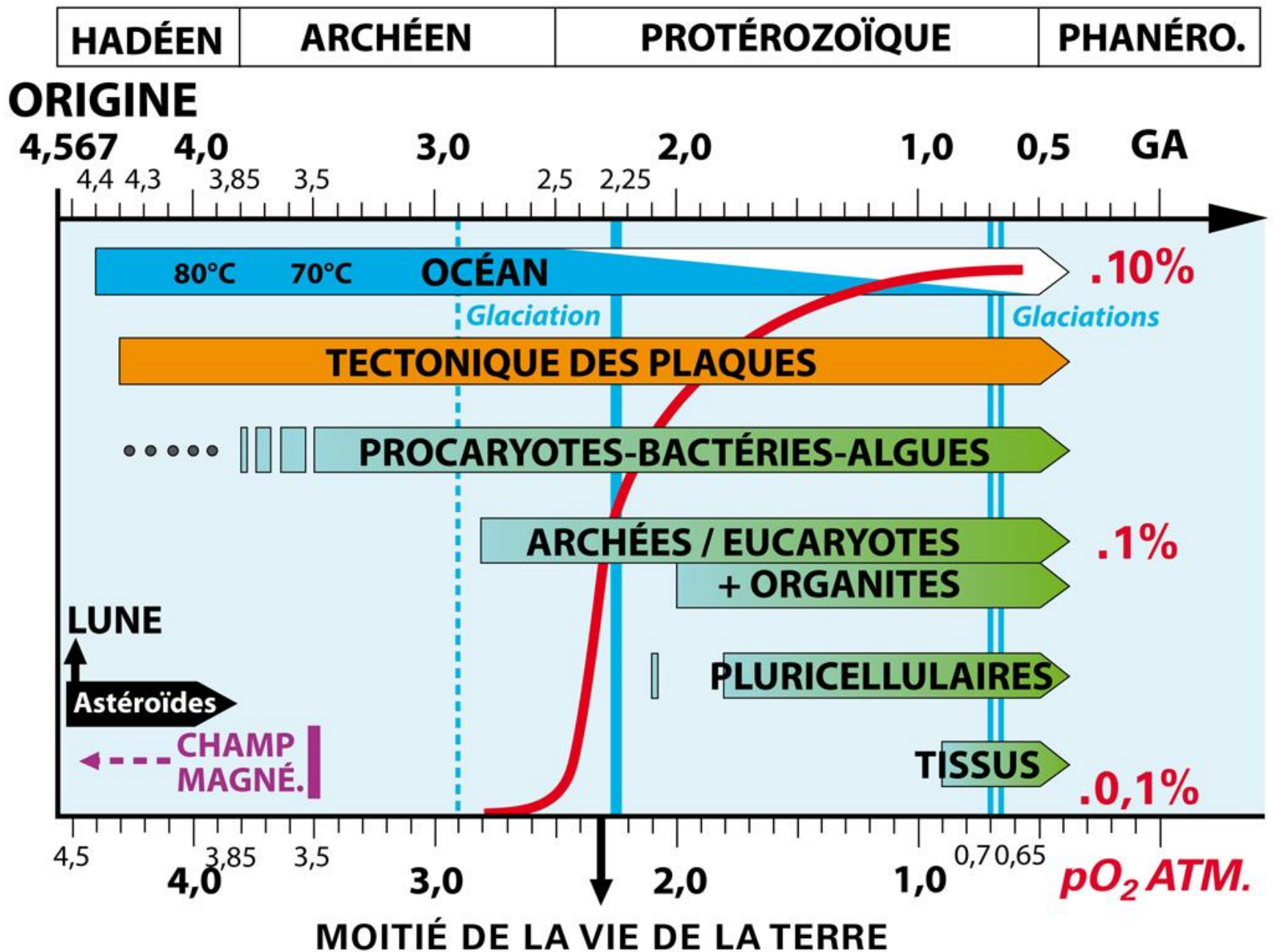


Le Sol et sa gestion durable

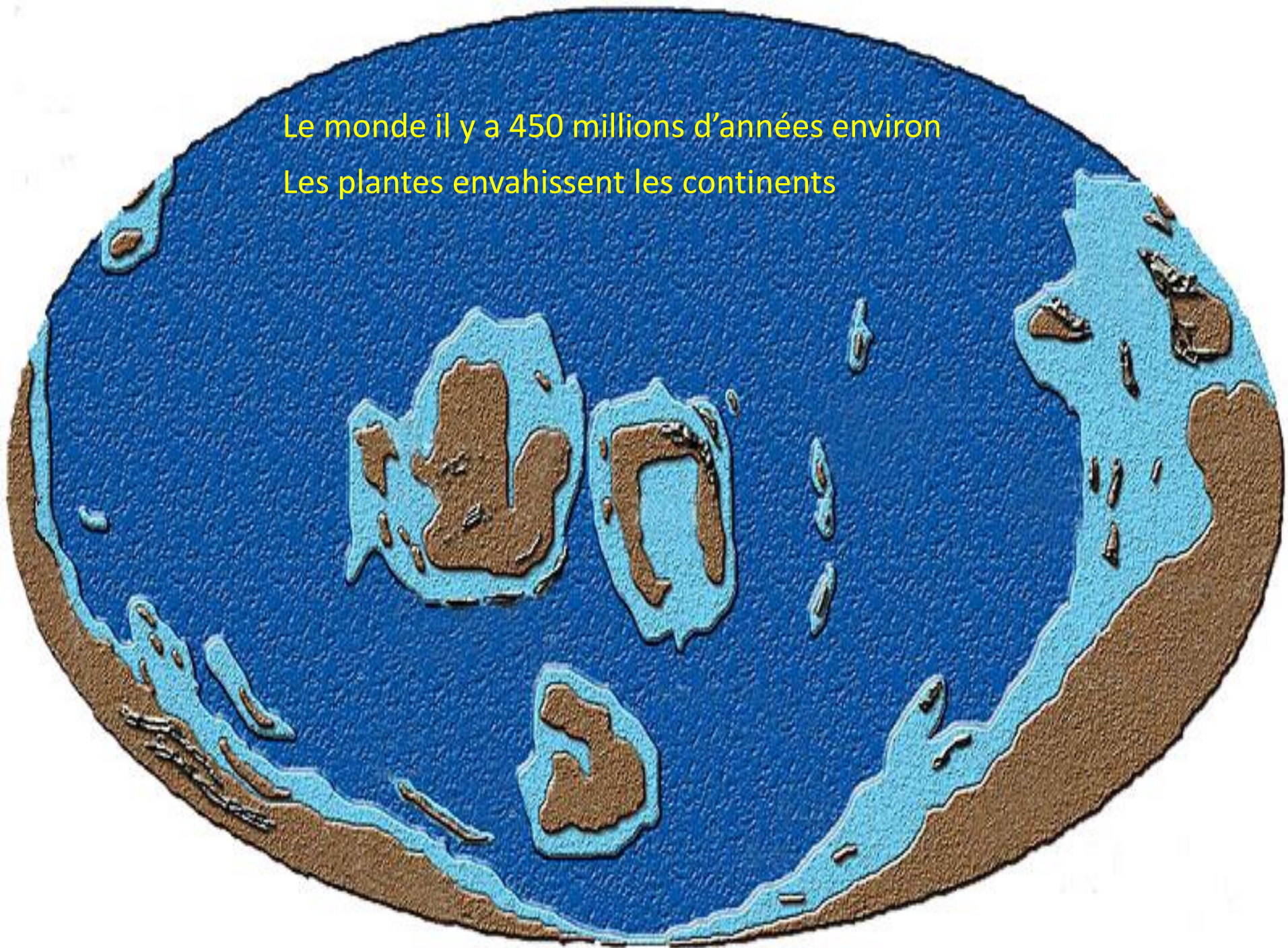


Daniel NAHON
Aix-Marseille Université
Château-Observatoire Abbadia (Hendaye)

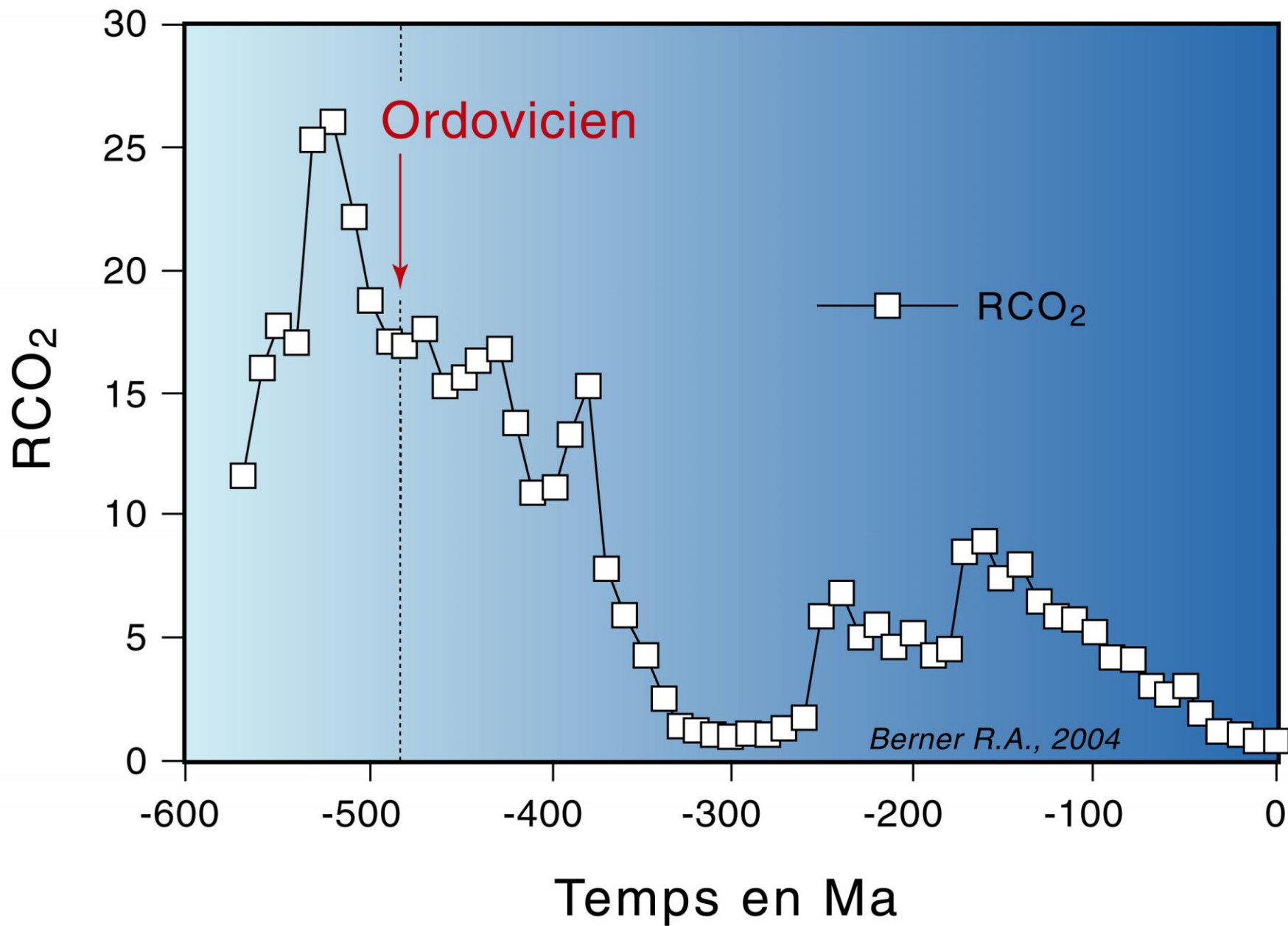
Pas de sol sans argile
Pas d'argile sans altération des
roches
Pas de vie ni de biodiversité sans
argile



Le monde il y a 450 millions d'années environ
Les plantes envahissent les continents

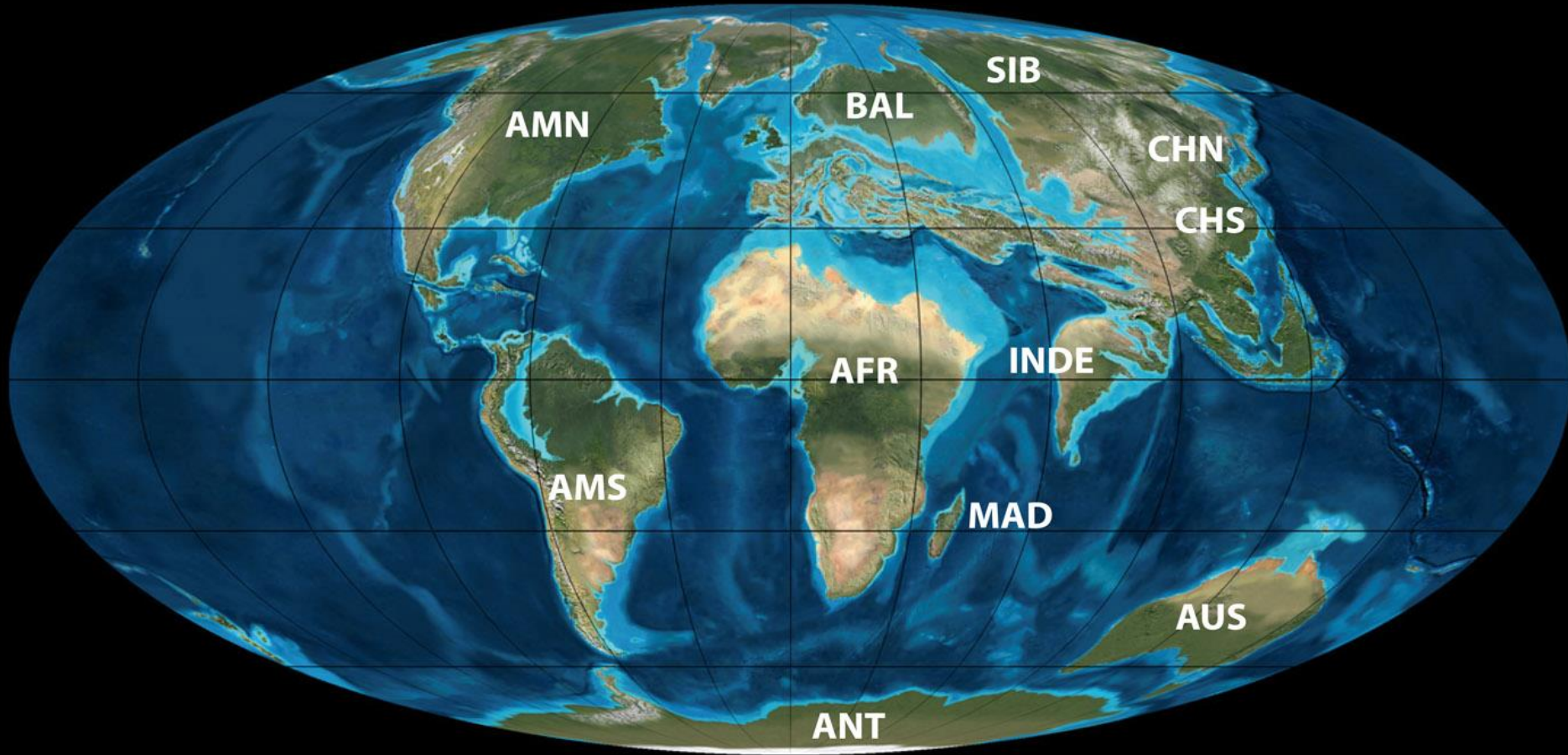


Courbe standard du GEOCARB III

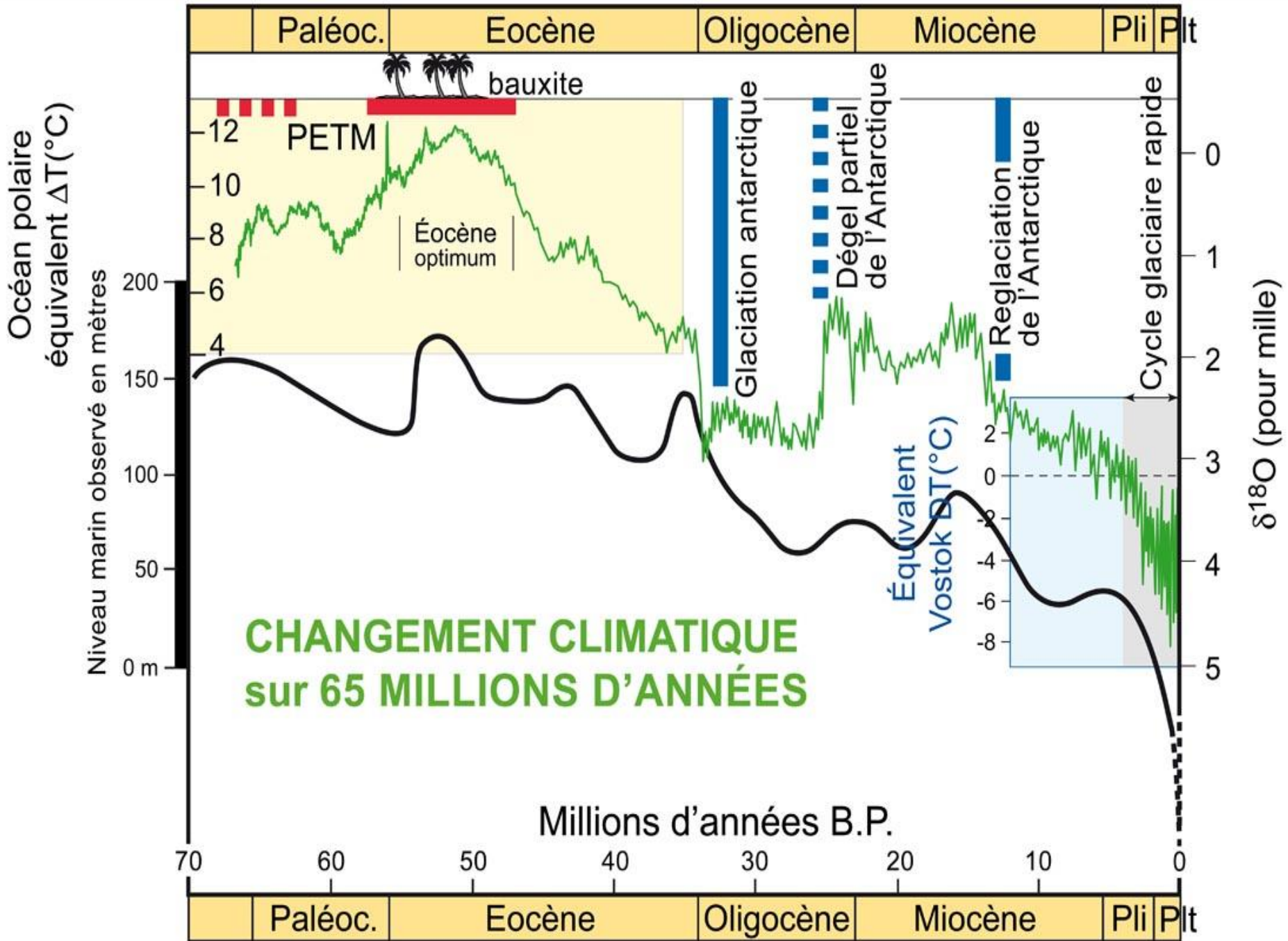


ÉOCÈNE

- 60 Ma



AFR : AFRIQUE, **AMN** : AMÉRIQUE DU NORD, **AMS** : AMÉRIQUE DU SUD, **ANT** : ANTARCTIQUE,
AUS : AUSTRALIE, **BAL** : BALTIQUE, **CHN** : CHINE DU NORD, **CHS** : CHINE DU SUD, **INDE** : INDE,
MAD : MADAGASCAR, **SIB** : SIBÉRIE.



d'après Wikipédia Paléocène, modifié



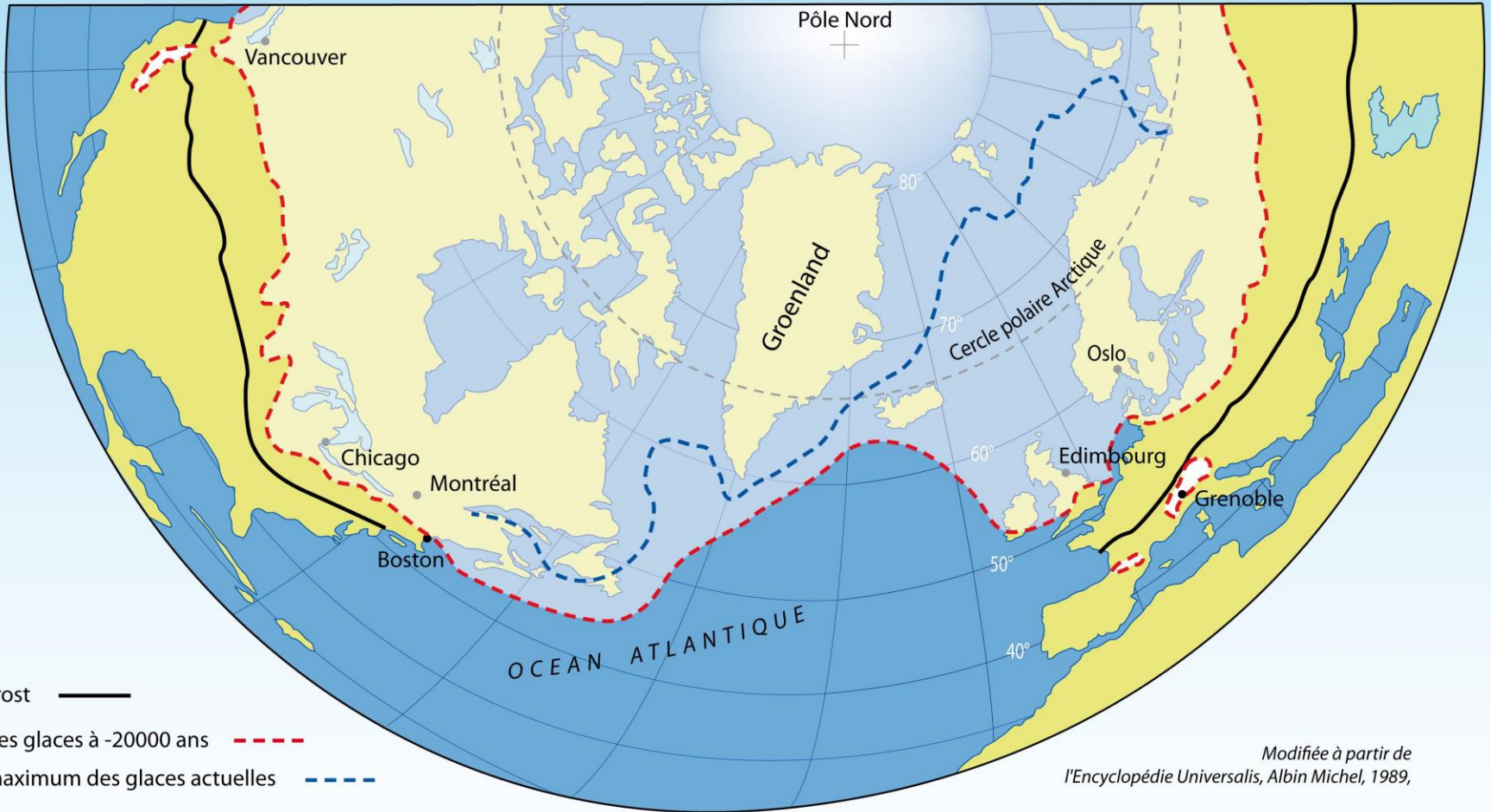
Photo F. Colin

Sol rouge de zone équatoriale humide



Latérite d'Indonésie: vue horizons A et B(oxisol)

RECONSTITUTION APPROXIMATIVE DE L'ÉTENDUE DES GLACES DE L'HÉMISPÈRE NORD IL Y A 20000 ANS

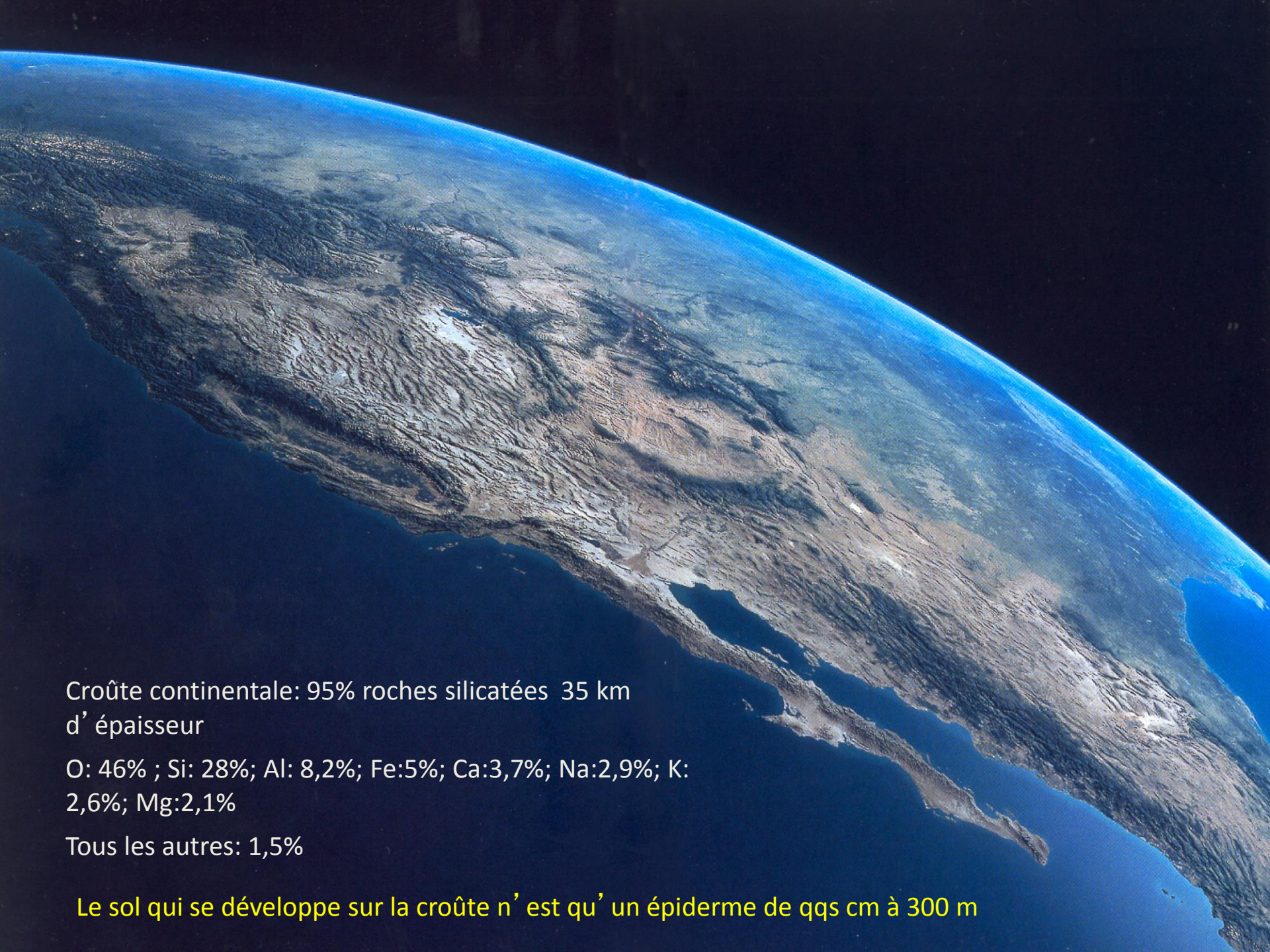


Modifiée à partir de
l'Encyclopédie Universalis, Albin Michel, 1989,





Sol brun de zone tempérée



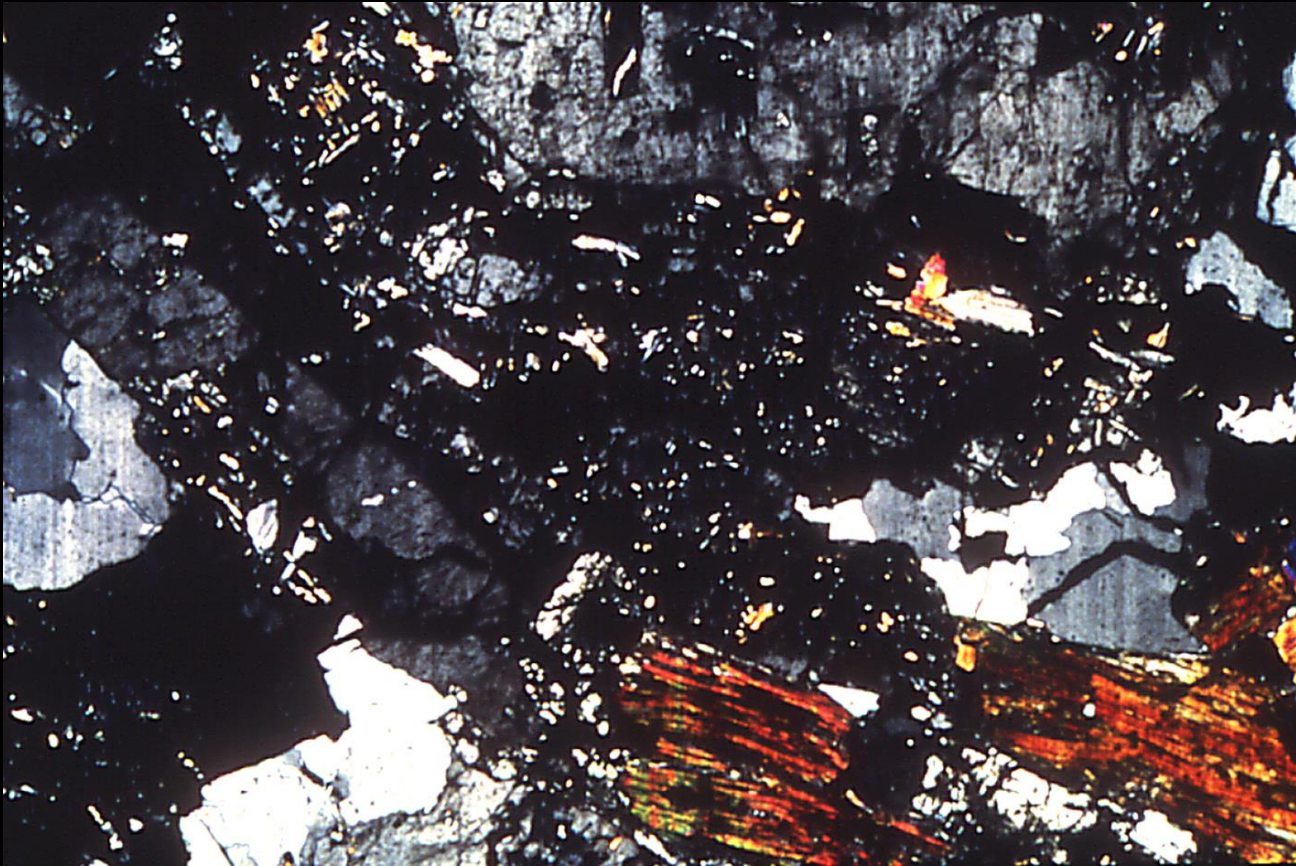
Croûte continentale: 95% roches silicatées 35 km
d'épaisseur

O: 46% ; Si: 28%; Al: 8,2%; Fe:5%; Ca:3,7%; Na:2,9%; K:
2,6%; Mg:2,1%

Tous les autres: 1,5%

Le sol qui se développe sur la croûte n'est qu'un épiderme de qq's cm à 300 m

Les roches mères et leurs minéraux

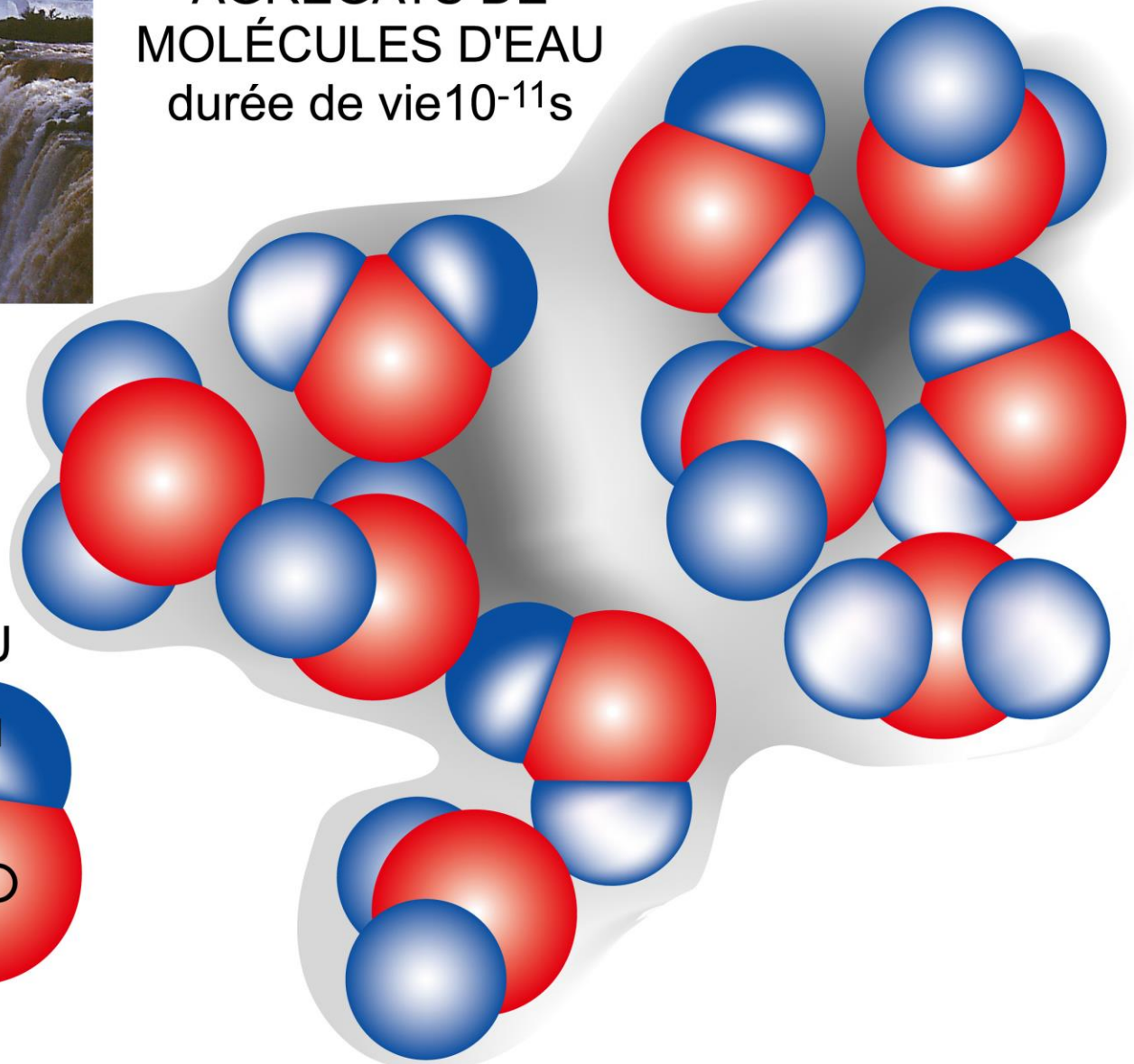
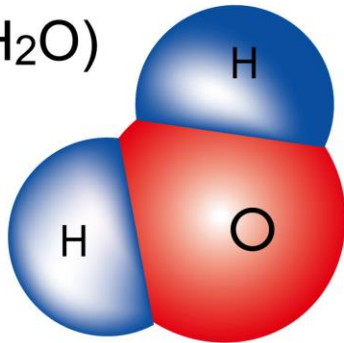




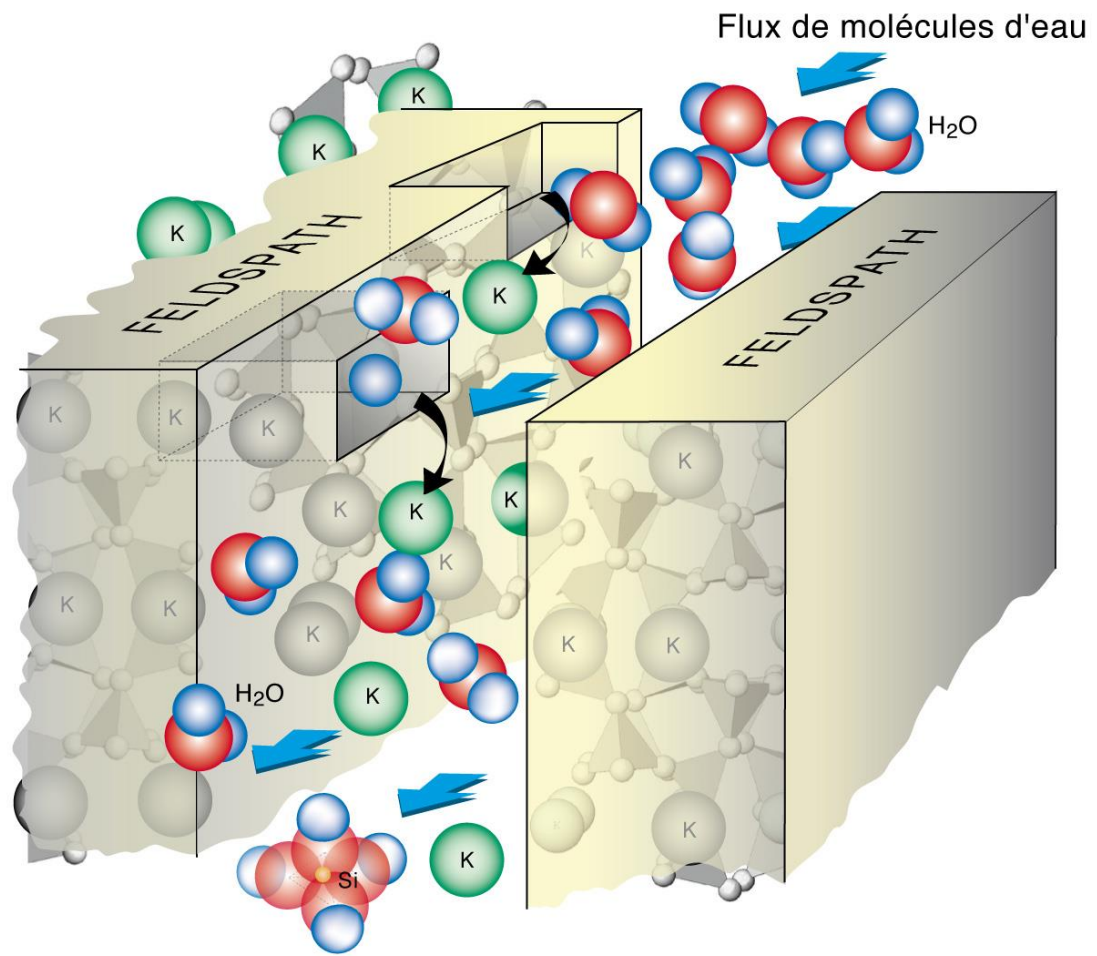
Les chutes d'Iguaçu
(Brésil-Argentine)

AGRÉGATS DE MOLÉCULES D'EAU durée de vie 10^{-11} s

MOLÉCULE D'EAU
(H_2O)

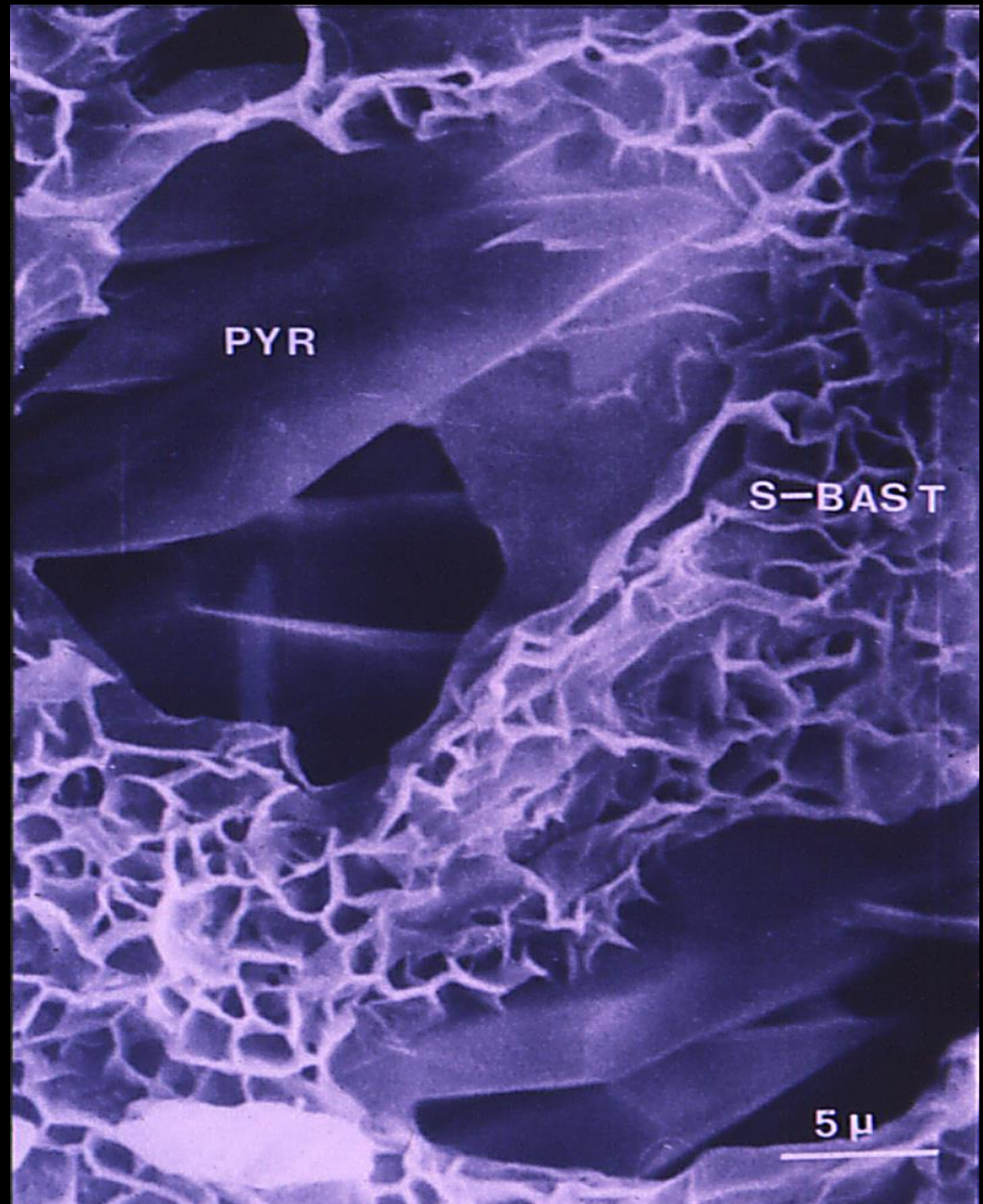


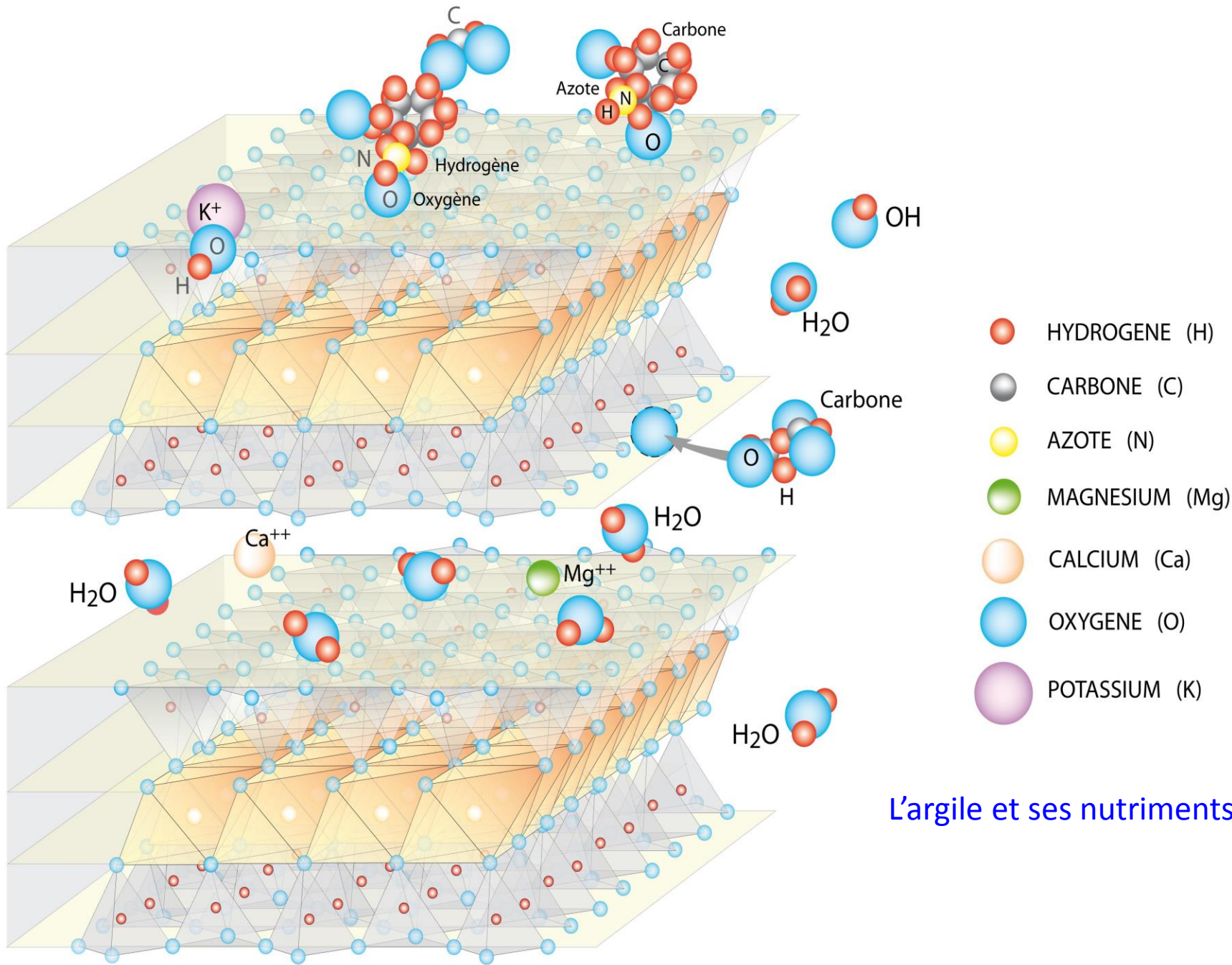
Liaisons très fortes entre atomes d'oxygène O et d'hydrogène H = molécule d'eau
Liaison moins forte d'une molécule à l'autre



Minéral parental
altéré

Et argile
(smectite)
précipitée





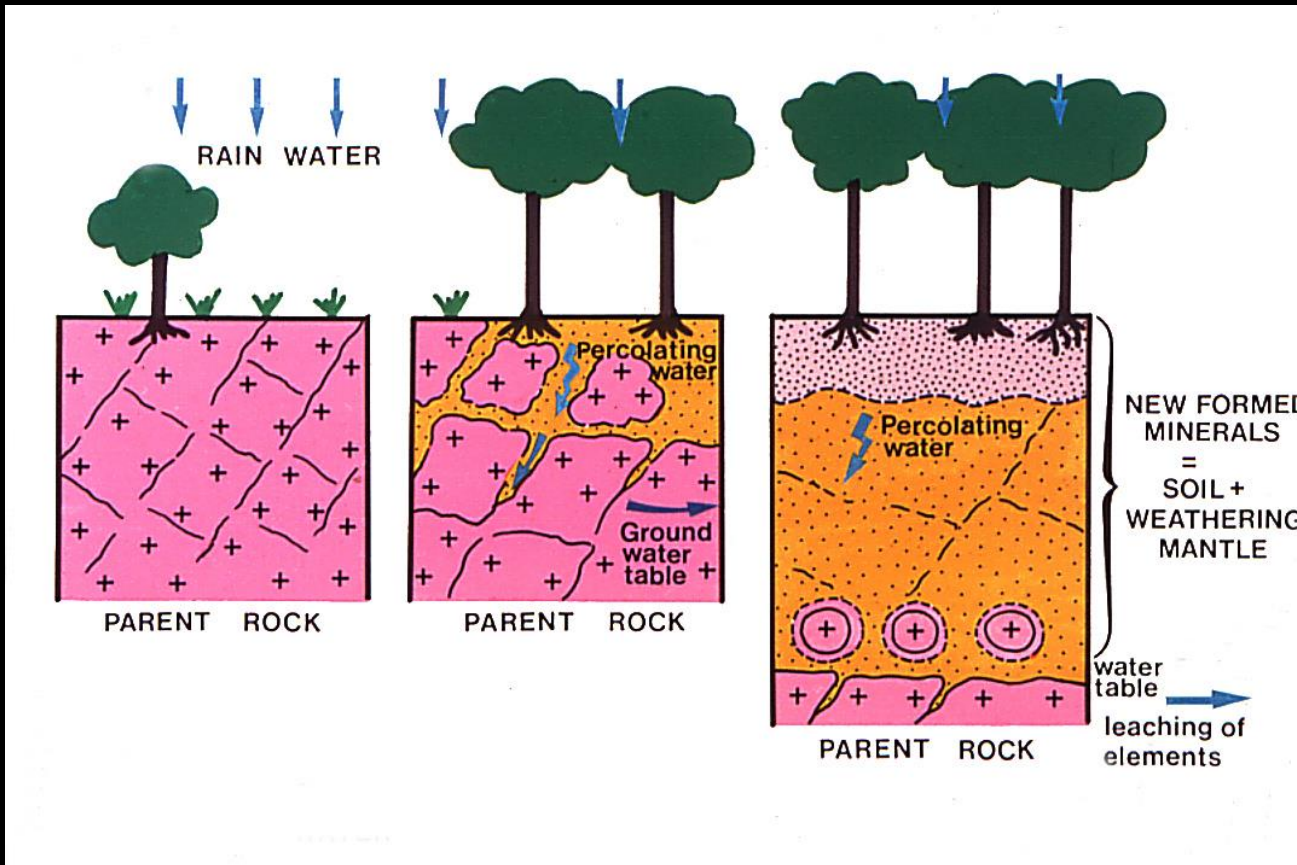
L'argile et ses nutriments



CLAYEY RED SOIL DEVELOPED AT THE EXPENSES OF GRANITIC ROCK

photo JP Ambrosi

Formation d'un sol

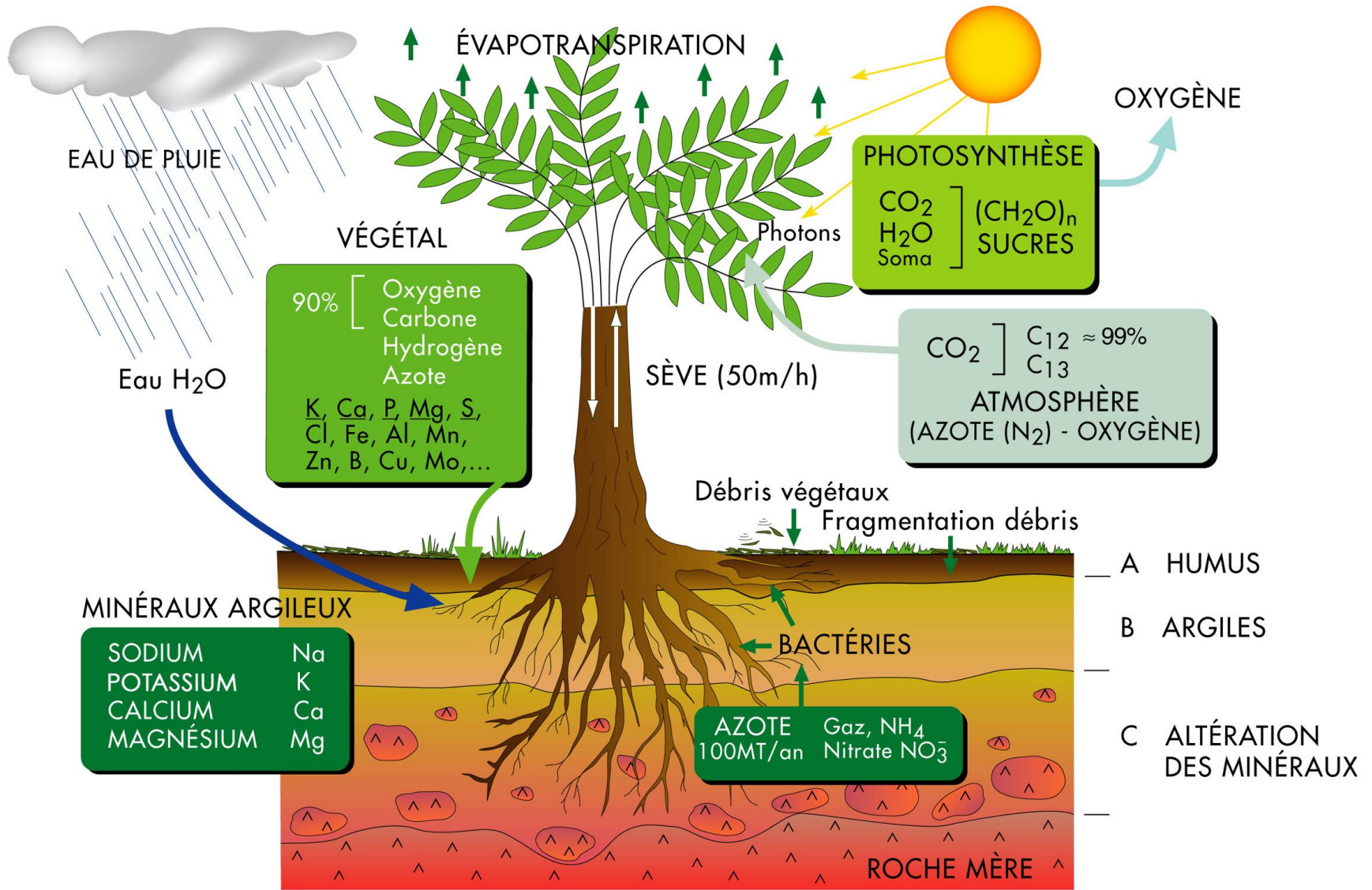


A
B
C



Étapes de l'installation concomitante de l'altération et de la végétation

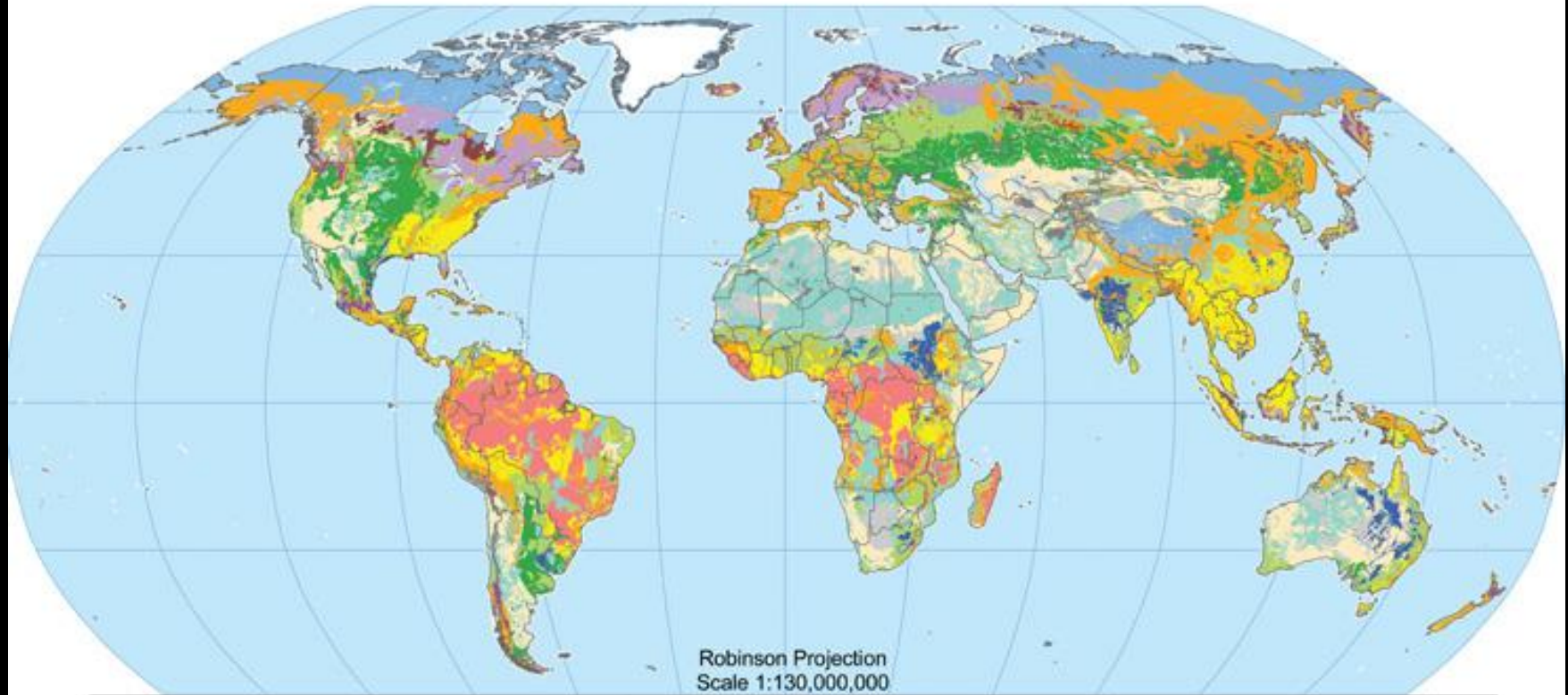
THE ATMOSPHERE-PLANT-SOIL SYSTEM






















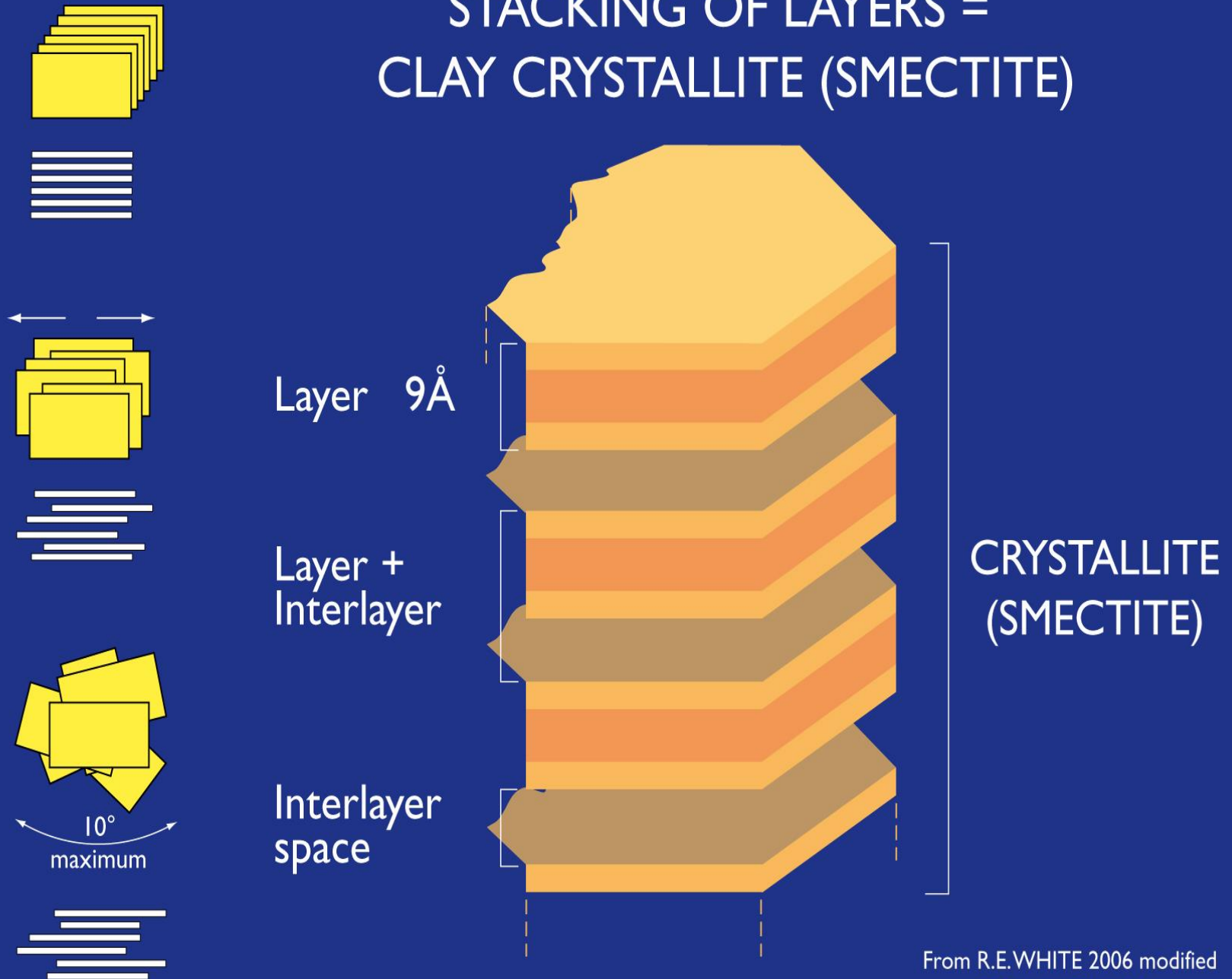
Global Soil Regions



Soil Orders

 Alfisols	 Entisols	 Inceptisols	 Spodosols	 Rocky Land
 Andisols	 Gelisols	 Mollisols	 Ultisols	 Shifting Sand
 Aridisols	 Histosols	 Oxisols	 Vertisols	 Ice/Glacier

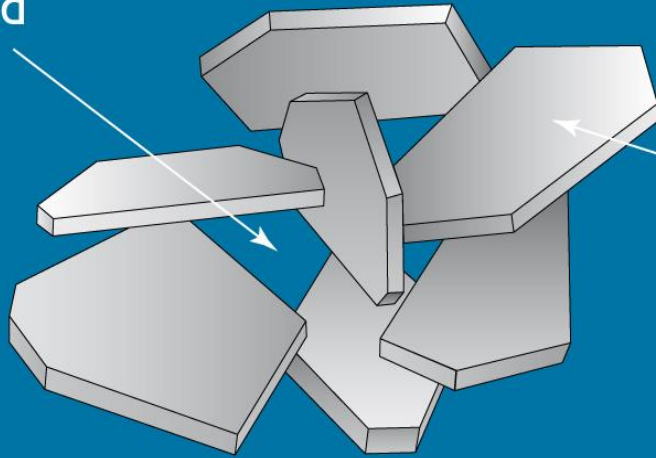
STACKING OF LAYERS = CLAY CRYSTALLITE (SMECTITE)



From R.E. WHITE 2006 modified
D.B. NAHON 1991

SPATIAL ARRANGEMENT OF CLAY CRYSTALLITES

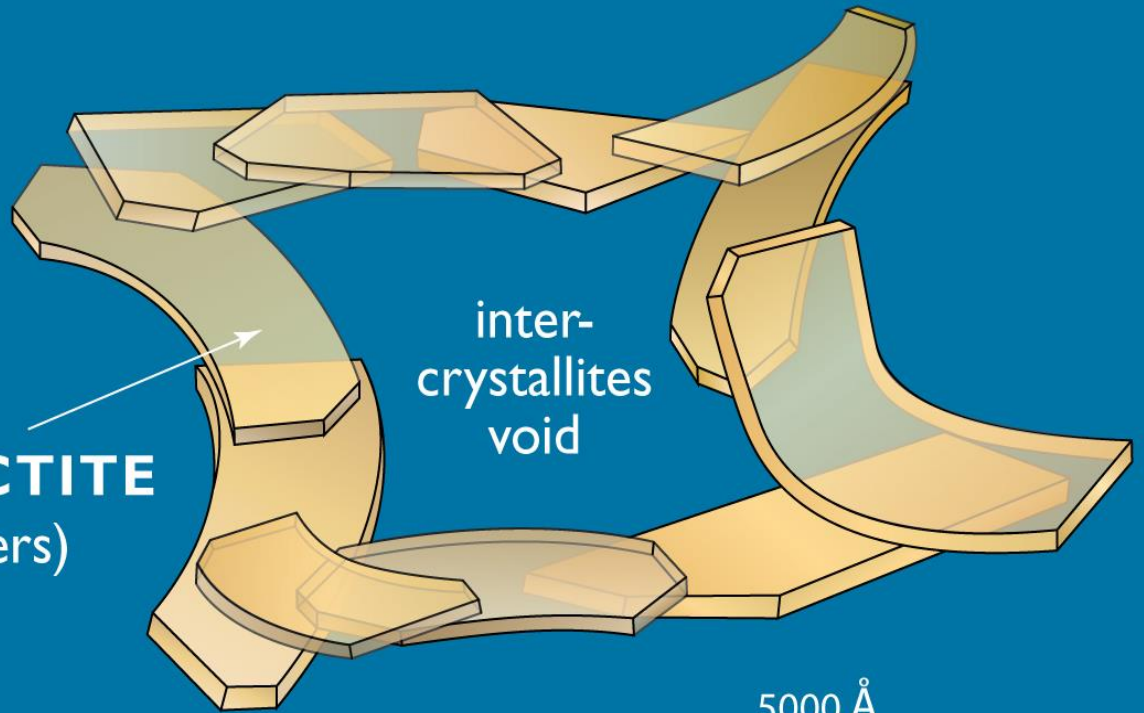
inter-crystallites
void



crystallite of **KAOLINITE**
(stacking of 20 to 100 layers)
($e = 140-700 \text{ \AA}$)

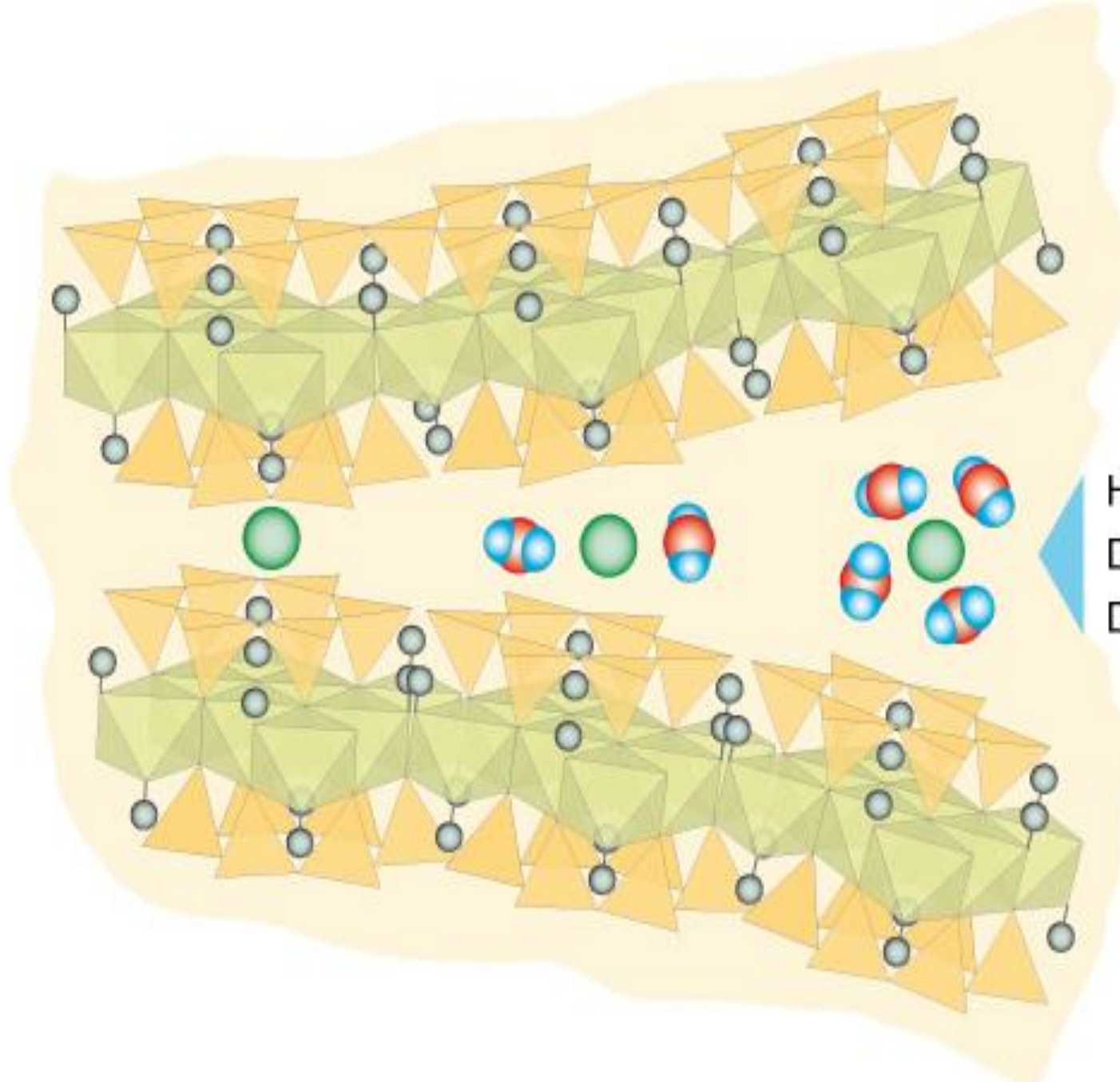
1 μm

inter-
crystallites
void



crystallite of **SMECTITE**
(stacking of ≈ 10 layers)
($e < 100 \text{ \AA}$)

5000 \AA
(500 nm)



HYDRATATION
DU FEUILLET
D'ARGILE

SOIL STRUCTURE



Le sol est un système global dont dépendent :

- Nutrition des hommes, des animaux, des végétaux = agriculture
- La biodiversité qu'il contient
- Eau douce continentale
- Énergie
- Climat
- Paysans

- A partir de la fin du XIX^e et surtout au XX^e siècle avec l'utilisation routinière du pétrole et de ses dérivés que l'agriculture change de visage (motorisation, voies goudronnées, engrais, pesticides, plastiques...)
- Agriculture extensive et intensive change les modes d'utilisation du sol

Deuxième moitié XX^e siècle

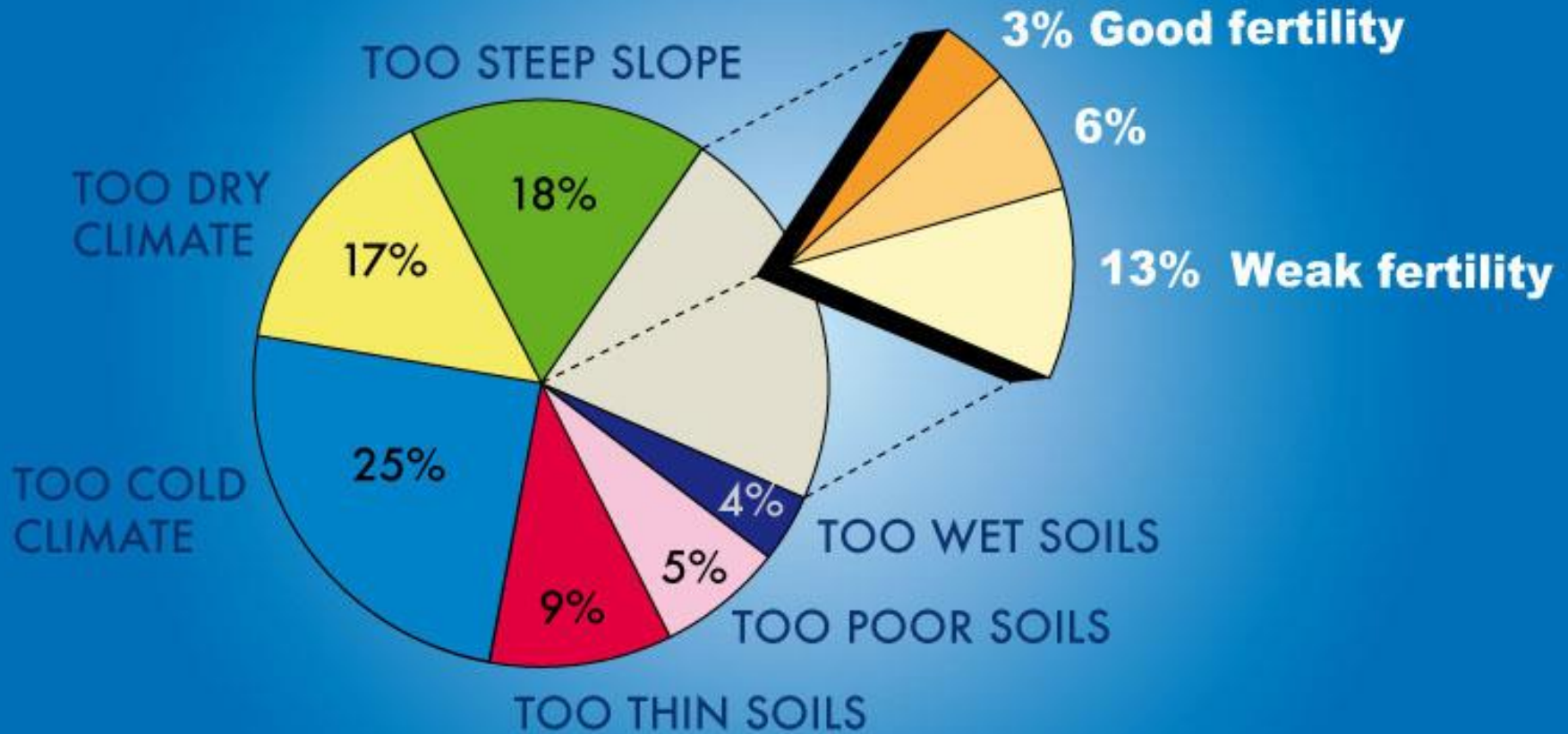
Surface terres cultivées augmentées 15%

Rendements augmentés de 75%

Consommation moyenne /j/pers :+ 30%

Durée moyenne de vie: + 25 ans XX^e siècle

22% TILLABLE LANDS

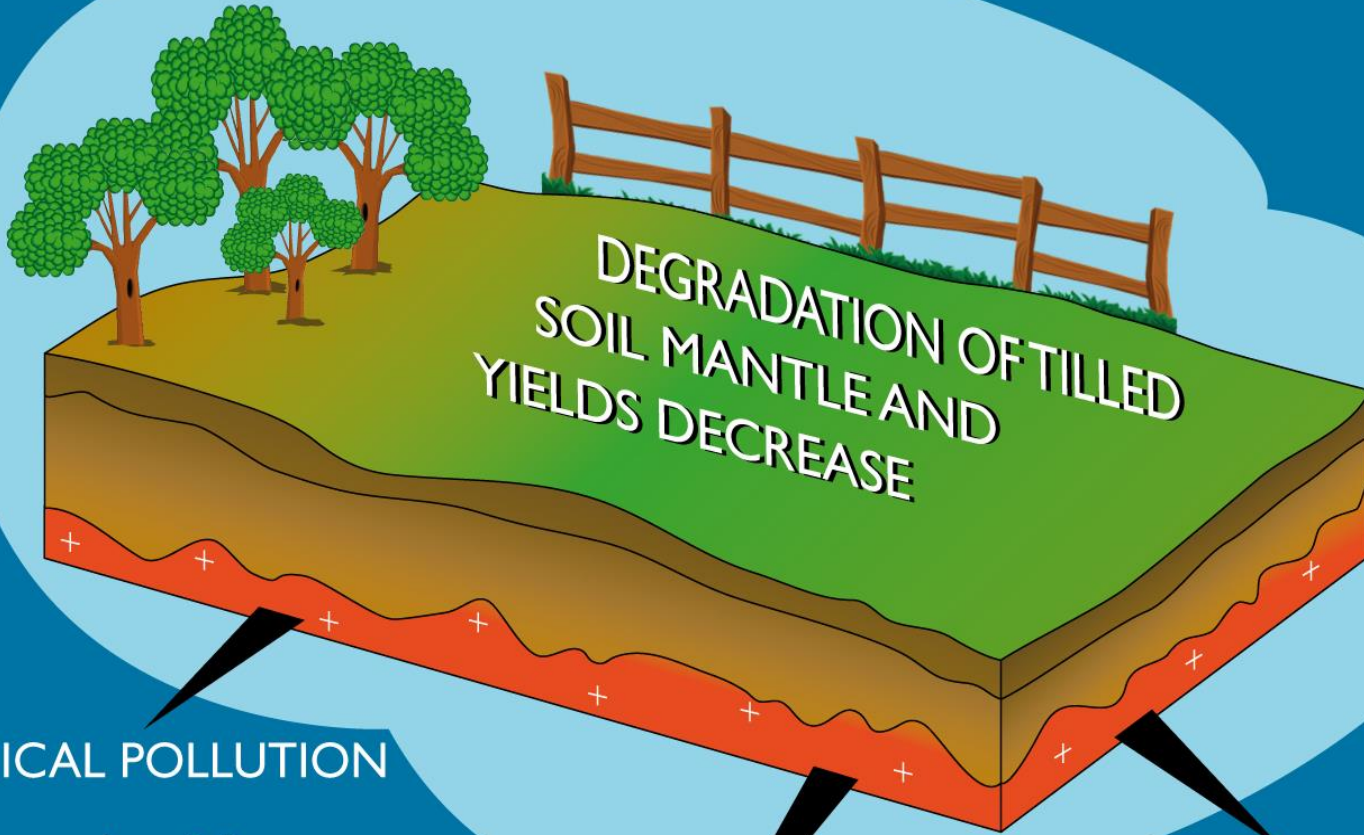


75% OF EMERGED LANDS COVERED BY SOILS, 22% SUITABLE FOR CULTIVATION (2.5 billion ha)

.LAND USED FOR AGRICULTURE TO DAY

- 1600 million hectares for crops
- 3500 million hectares for grazing (not enough thick or fertile to sow)
- Misuse of soils : 300 million ha of crop lands already destroyed(- 20%)
- 10 to 20 million ha.yr⁻¹ of cropable soils destroyed by degradation
- **CROPLAND WORLD RESERVE IS NOW LIMITED TO 600 million ha**

10 à 20 Mha/yr



CHEMICAL POLLUTION

Heavy metals, mining
Sewage sludge
Radionuclides...

STERILIZATION

Salinization
Loss of soil biodiversity

DESTRUCTION

Erosion
Urbanization

FOREST CLEARING



14 million ha/yr = 0.9% World forest cover

PLOUGHING PRACTICES

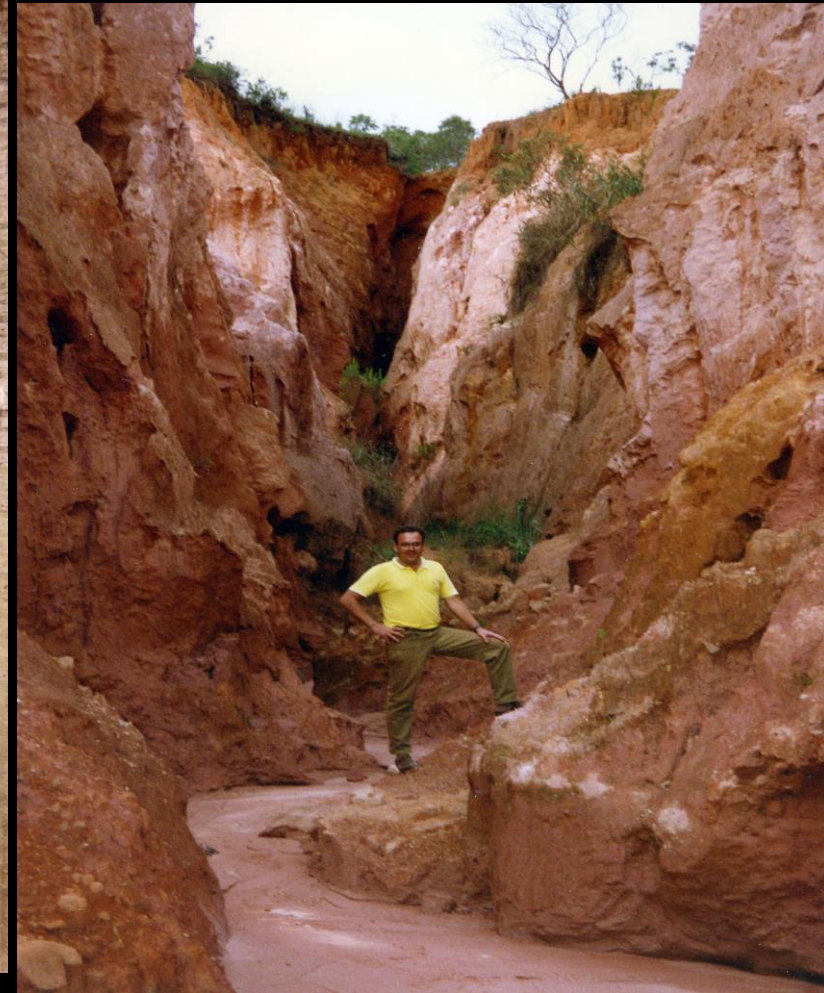


Erosion rates >10 to 100 compared with field covered with natural vegetation

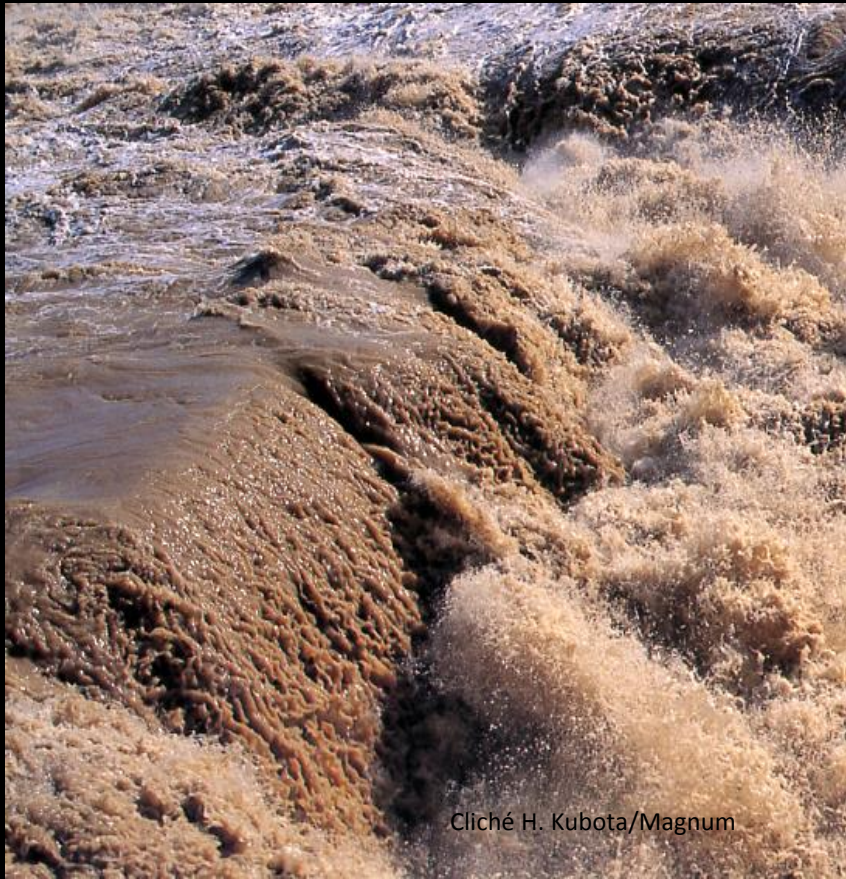


Cliché Inra

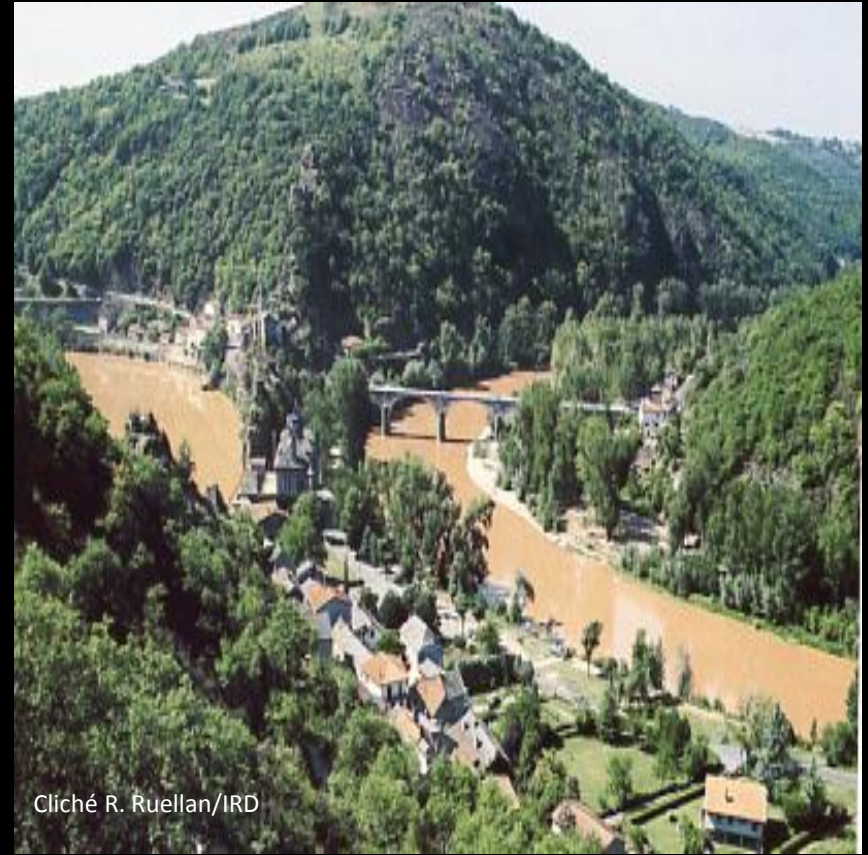
Cultivation furrows along the slope behave as rills and rills deepen into severe gullies



La terre (argile) érodée est transportée par les rivières



Cliché H. Kubota/Magnum



Cliché R. Ruellan/IRD



... et qui comble le lit des rivières

Érosion par pâturage excessif



Cliché A. Ruellan/IRD

Tilled fields erosion

loss average rates of soil material

- **> 20t/ha/yr** for 20% of cultivated areas
- Between **7.5t/ha/yr** & **20t/ha/yr** for 50%
- **< 7.5t/ha/yr** for 30%

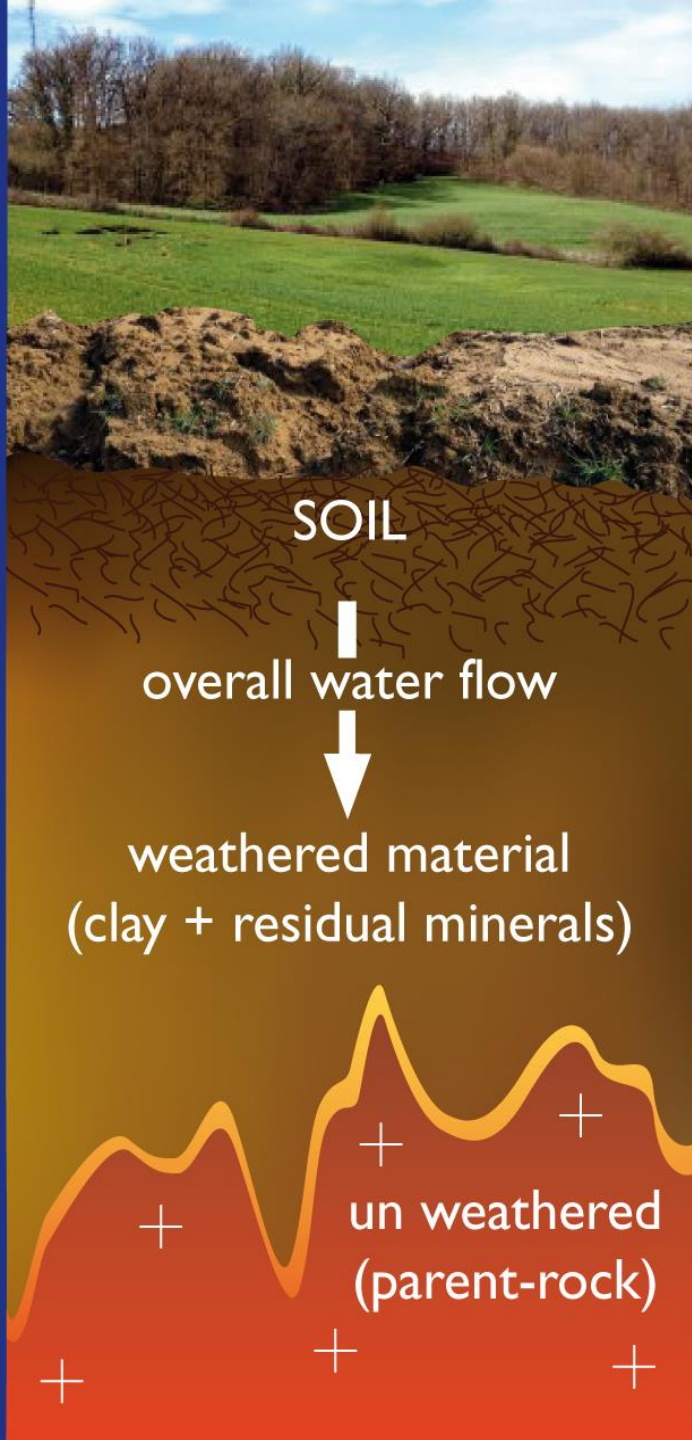
- Compared with long-term natural rates of soil erosion: **< 0.5t/ha/yr**

Pour une érosion modérée < 3t/ha/an

Perte

- 25 kg/ha/an de C organique
- 10 kg/ha/an de N organique
- 3 kg/ha/an de P
- 10 kg/ha/an d'ions échangeables (K; Na; Ca; Mg; oligoéléments...)
- 10 à 25% des engrais ajoutés
- 30 à 40% des pesticides répandus

EROSION OF TILLED SOILS BY MISUSE AND BAD FARMING PRACTICES

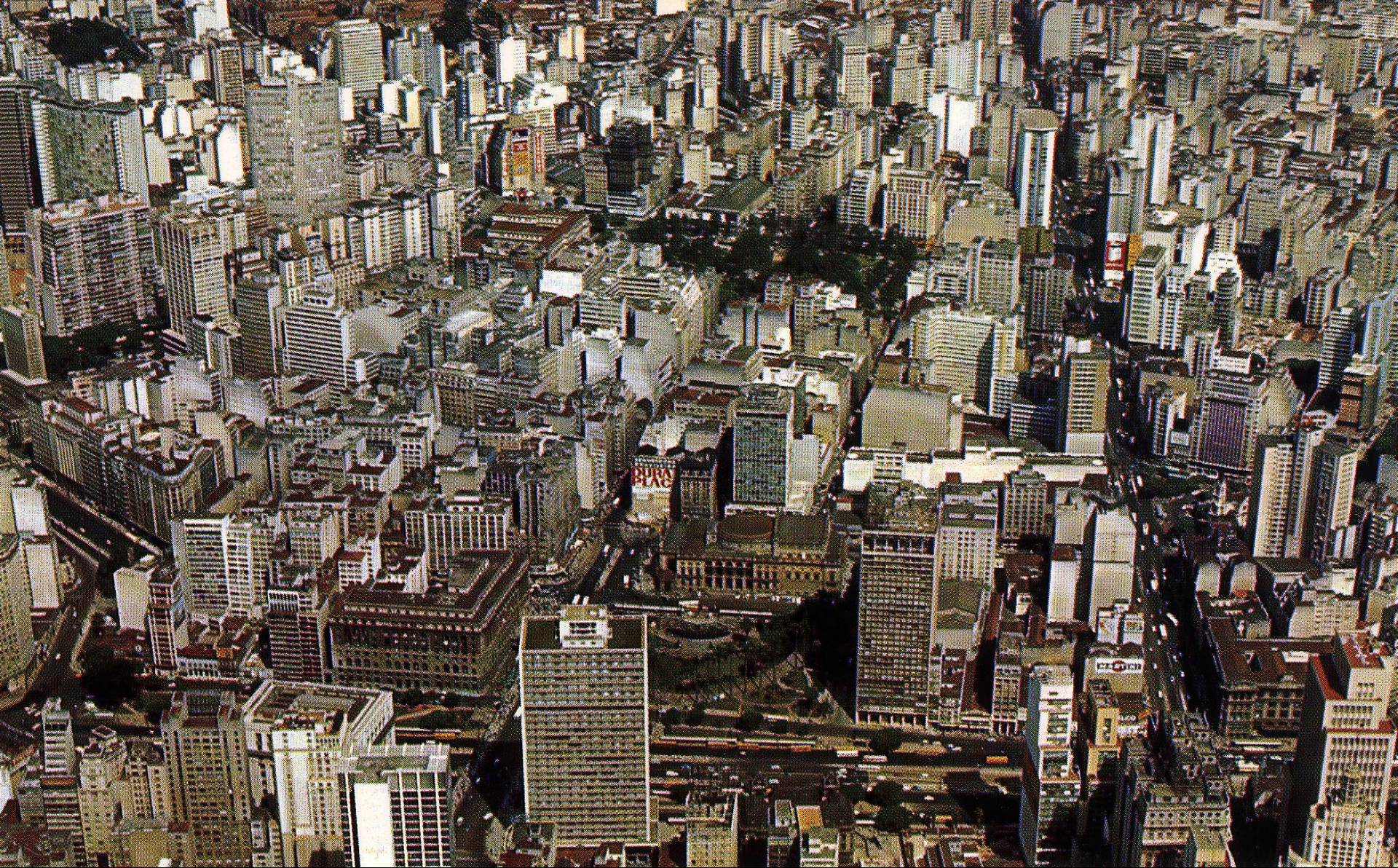


Erosion front

10 to 100 times faster
50 cm to 5 m / 1000 years

Weathering front

deepening of weathering front
(SOIL FORMATION)
50 mm / 1000 years



USA: 100m² cropland destroyed each second, CHINA: 500m²...

both countries urban dvpt each year = 5 times the Denmark area



Irrigation par pivots (Arkansas)

L'eau douce sera nécessaire pour doubler la production agricole

- Aujourd'hui 20% des terres cultivées sont irriguées et produisent 40% de la nourriture mondiale, l'eau prélevée (nappes, fleuves) = 10 fois le débit annuel Nil
- Demain (2050) il faudrait multiplier par 5 cette irrigation = l'équivalent du débit annuel de 50 Nil

Eau Virtuelle

- Produire 200kg de viande de bœuf de 3ans nécessite 1300kg de grains, 7200 kg de fourrage, 24m³ d'eau à boire et 7m³ d'eau pour les services
- **1kg viande de bœuf: 15 à 20000 litres d'eau**
- **1kg viande de porc: 4900 litres d'eau**
- **1kg viande de poulet: 3900 litres**

EAU DOUCE GLOBALE UTILISÉE

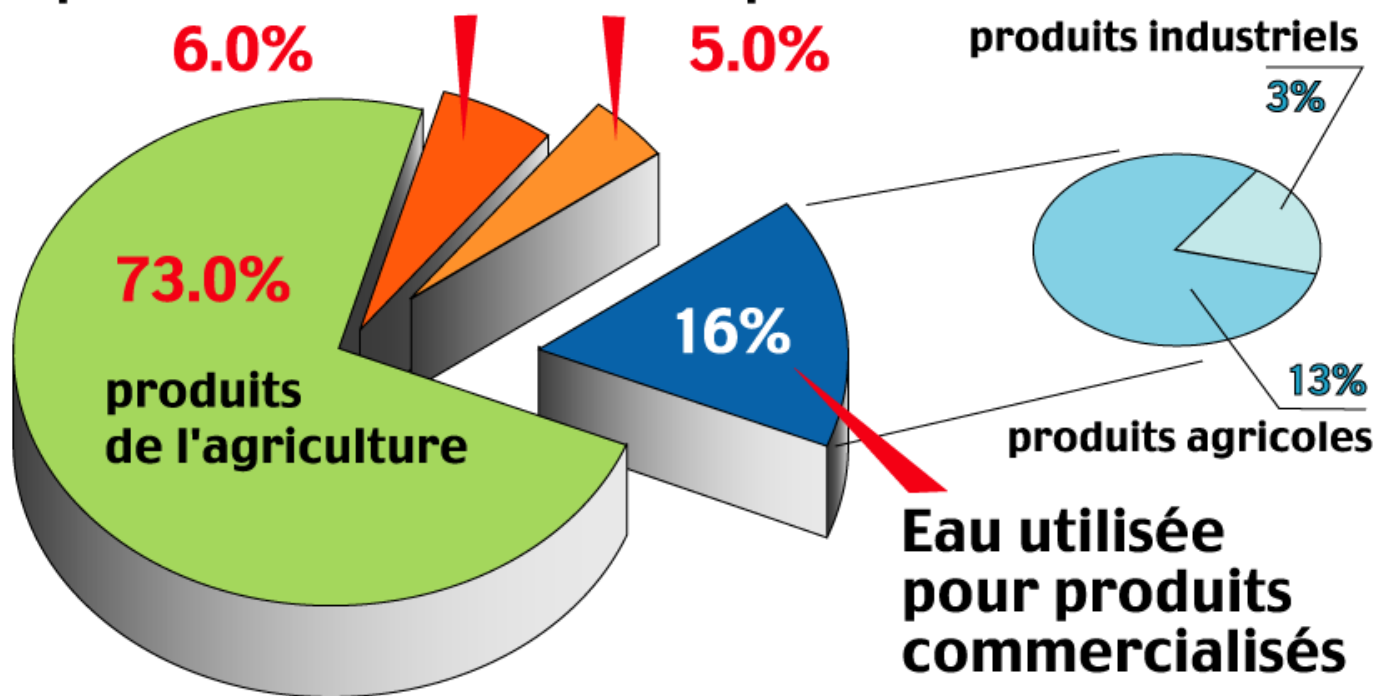
7450 Gm³/an

consommation pour
produits industriels

6.0%

consommation
domestique

5.0%



AGRICULTURE = 6400 Gm³/an

Soil is a living environment

- Living biomass weight of the 0-30cm topsoil:

8t/ha (= 500 Sheep/ha)

Owing to:

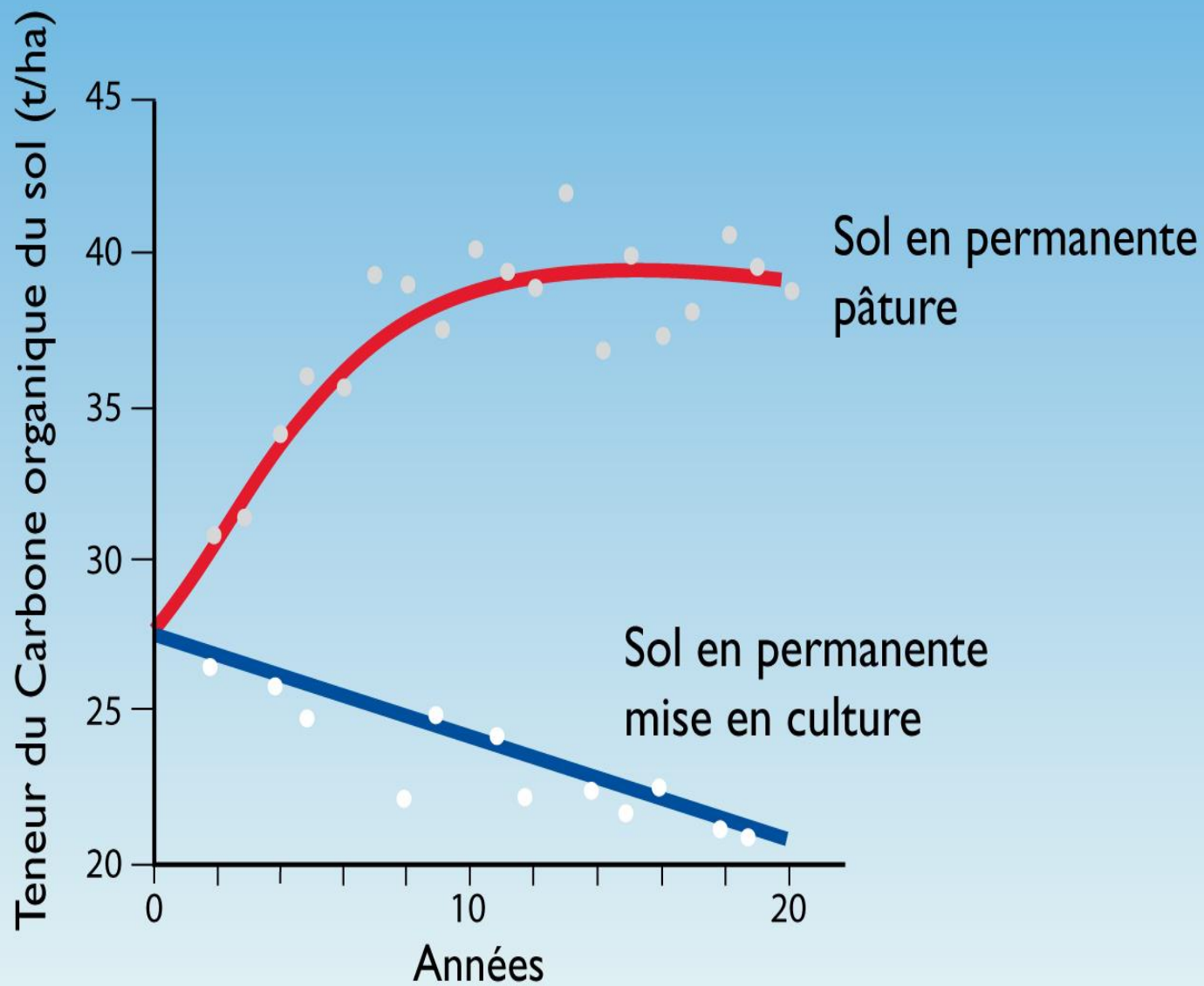
Clays & clay minerals

Organic matter

labours, monocultures et intrants chimiques épuisent la terre arable



CARBONE ORGANIQUE DU SOL



D'après Ellis S. & Mellor A., 1995 modified

- **300,000**
- espèces végétales connues
- **100,000**
- espèces utilisées par l'homme
- **30,000**
- sont comestibles
- **7,000**
- sont utilisées comme nourriture
- **120**
- sont importantes à l'échelle nationale
- **30**
- fournissent 90% des calories alimentaires
- **3**
- fournissent 60% (riz, blé, maïs)

The mitigation of soil biodiversity

- 40% biodiversity loss under monoculture
- 80% biodiversity loss when using pesticides

(Agren G. A. et al. 2010; Cortet J. et al. 2007)



- 4% of global maize production
- 6% of global wheat production

énergie

- L'agriculture consomme 4 fois plus d'énergie que l'Industrie

La tentation énergétique des biocarburants

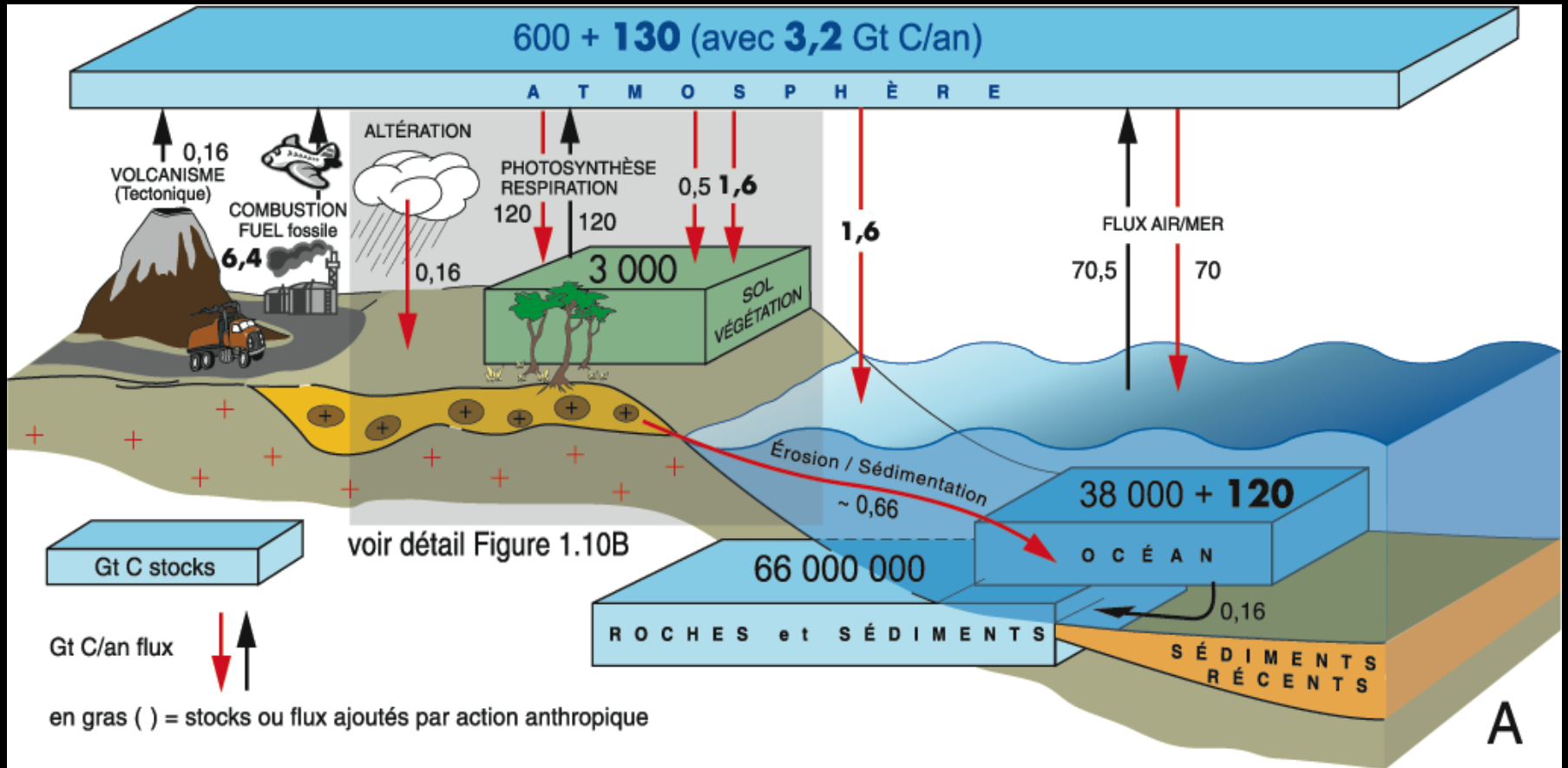


- En 2005: 43 millions tep/an; l'éthanol= 90% des biocarburants (maïs, canne à sucre)
 - Ce sont: 5% production mondiale de céréales (100Mt);
 - 17% production plantes sucrières(320Mt)
 - 9% production oléagineux(11Mt)
- = 28 millions ha = presque 6% surfaces cultivées
- AIE préconise d'atteindre 3,5 Gtep (26% des combustibles, soit la production pétrolière actuelle) soit x 80 la production de biocarburants

Ce plan d'énergie qui lutte contre le réchauffement est un faux nez

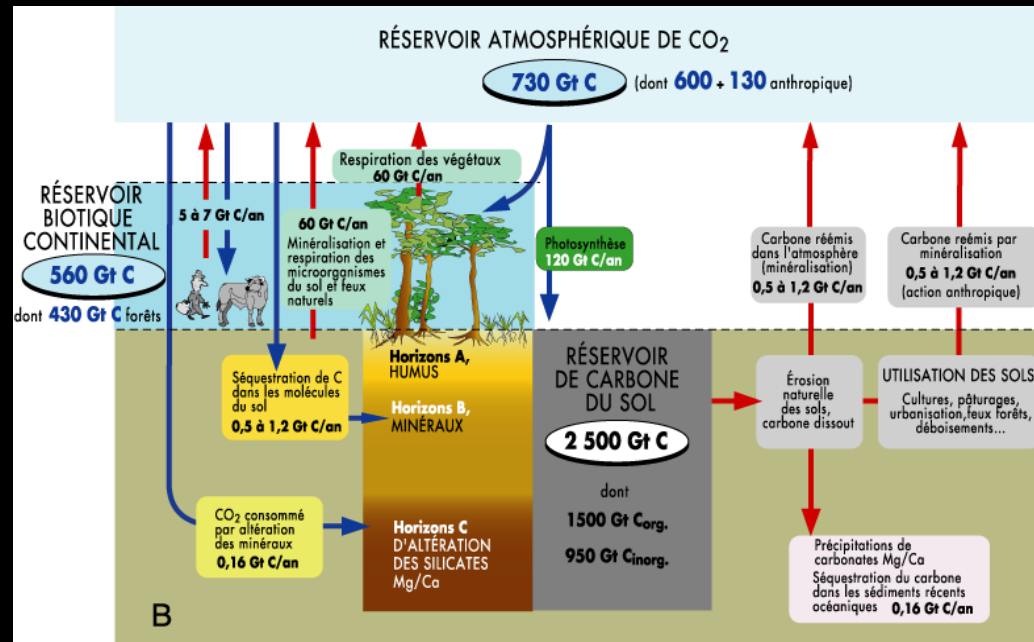
- Préoccupations alimentaires et environnementales reléguées au second plan
- Plus de déforestation, CO₂, N₂O, engrais, pesticides, irrigation.
- Passage 1^e à 2^e génération préjudiciable à la vie du sol
- Regarder vers déchets et microalgues

Cycle global du carbone



Le rôle de l'agriculture dans la production de gaz à effet de serre a été minimisé

- Bactéries sol et végétaux supérieurs contrôlent cycle du CO_2 et N_2O
- Mise en culture d'une forêt: $1000\text{t CO}_2/\text{ha}$
- Mise en culture d'une prairie: $300\text{t CO}_2/\text{ha}$



800 t mo/ha si perte 1% = 8t/ha à compenser par engrais

1tep= 8 barils de brut

- De 1850 à 2000: contribution cumulée en CO₂ atm.: entre 190 et 260 Gt

-GES émis par agriculture: + 25% en 15 ans (CO₂, CH₄, N₂O, H₂O_{vap.})

- Sol: plus gros moteur du monde à réguler

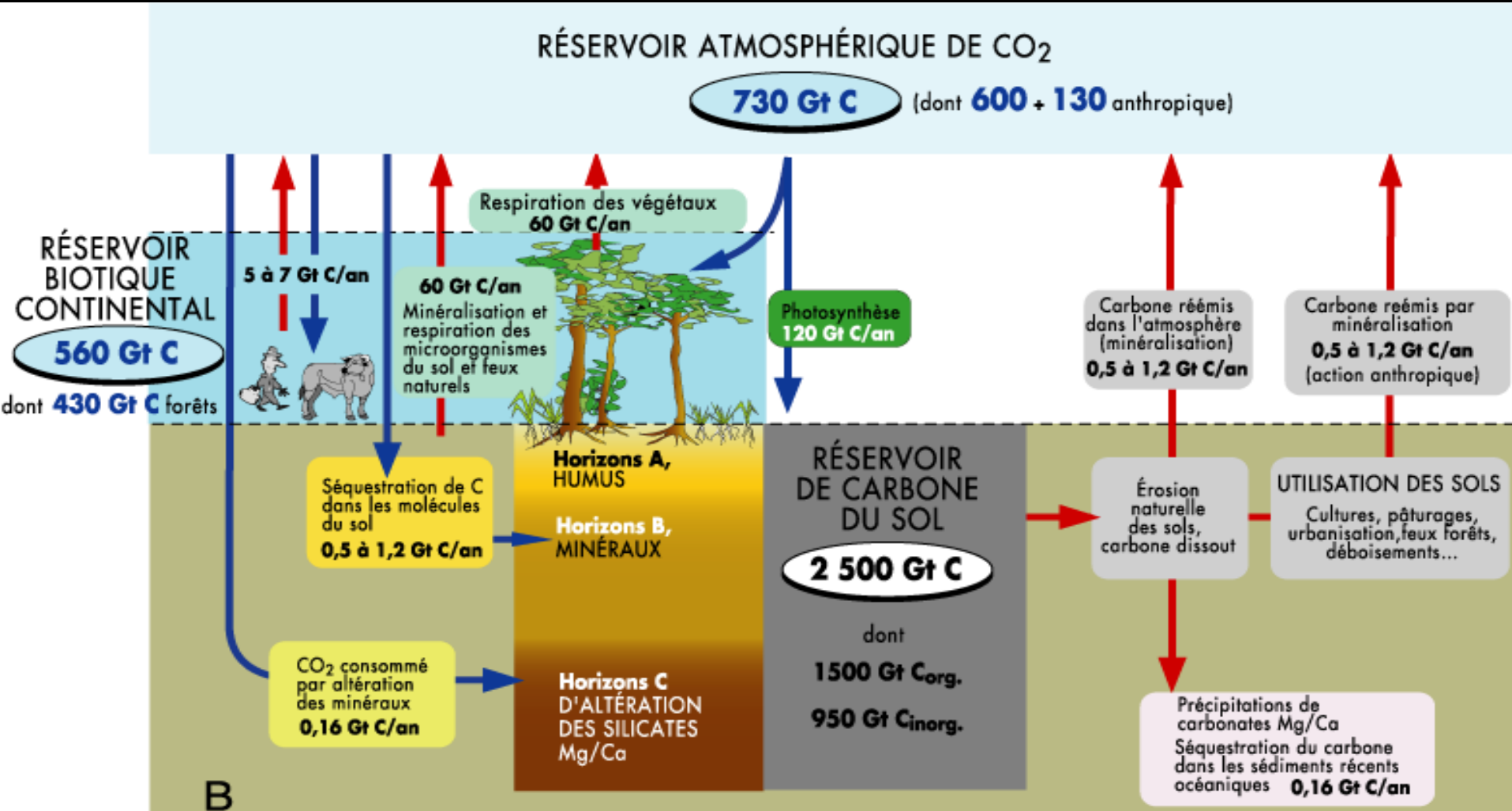




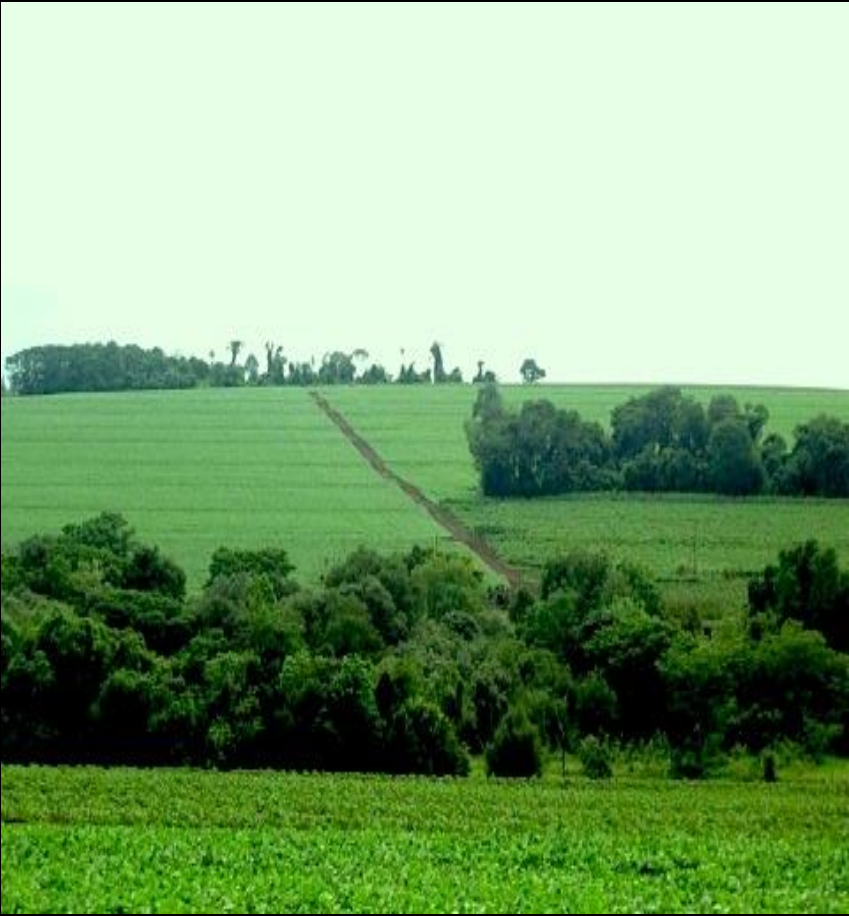
Photo E. Bard

- **Sur les 925 Millions de sous-alimentés en 2010**
- - 80% sont des ruraux (50% des paysans pauvres, 22% des paysans sans terre, 8% des pasteurs nomades, habitants des forêts, etc.)
- - 20% des urbains pauvres
- **Donc l'agriculture est au cœur du problème**

Give up traditional method of cultivation used in western agriculture



Stop ploughing up and down a slope which is the worst soil management practice





Le non labour ou semis direct

...reduces evaporative losses of water thanks to the decreasing of T° of the topsoil





NO- TILLAGE combining retention of residues, , no disruption of the natural soil structure, protects the soil from erosion, decreases 40% tractor hours,and..



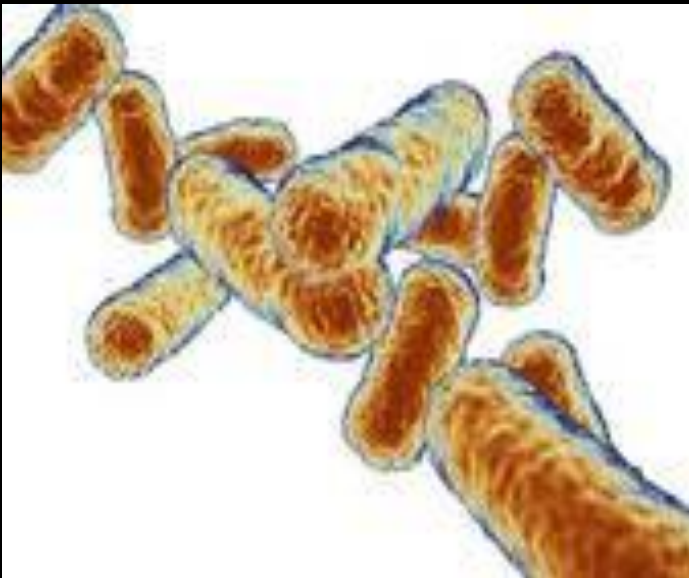
Amender les terres épuisées avec des argiles

Improve nutrients soil capacity by adding clay to the impoverished soils



Microbial biomass: bacteria, actinomycètes, fungi, algae, protozoa...

- Control CO² cycle
- And N cycle



earthworms: 10 million/ha in grassland soil
eat 90t OM./ha/yr; turn over 200 t/ha/yr

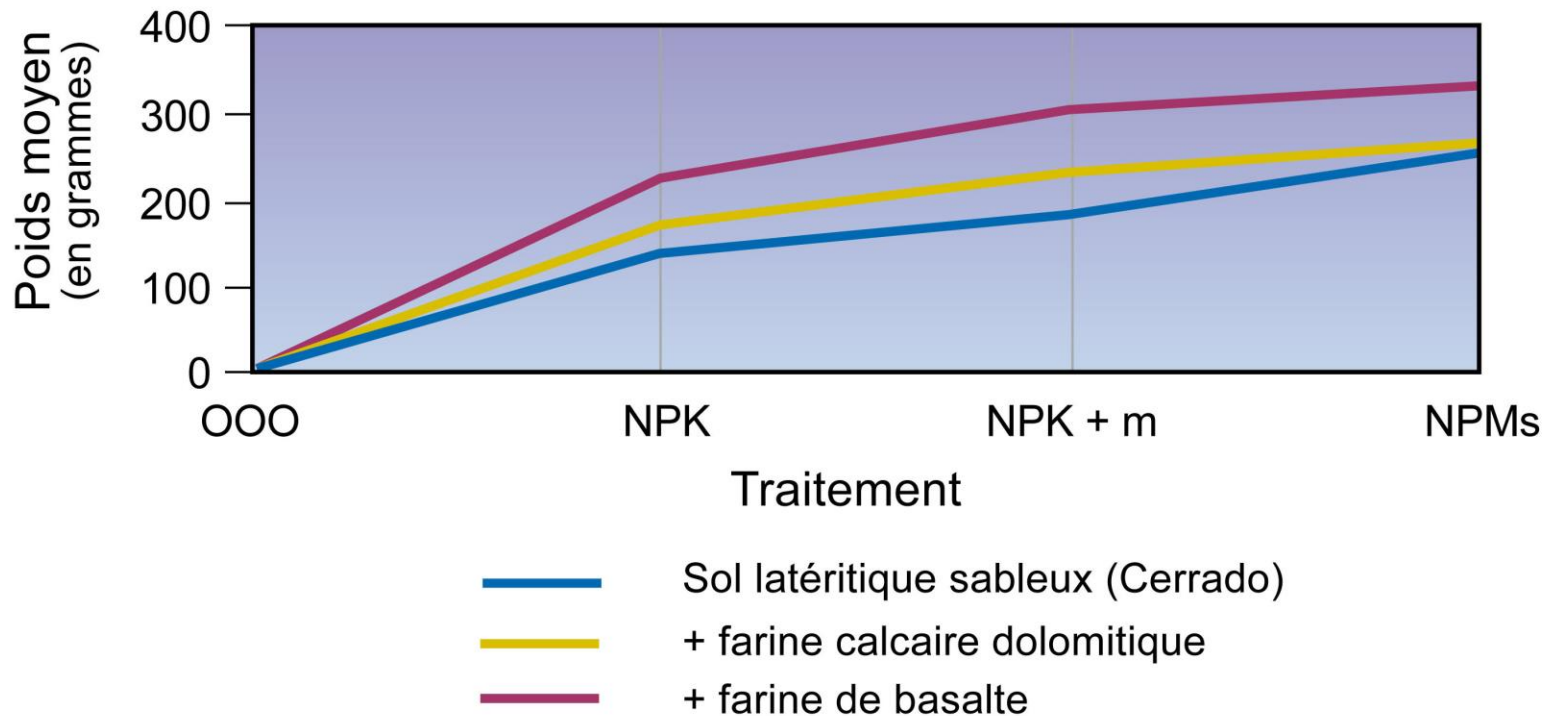


A biological plough which
uniformly distributes OM





EFFET COMPARATIF SUR
LE RENDEMENT DE HARICOTS
(O.H. Leonardos et S.H. Theodoro, 1999)



M.O. %

CEC meq/100g

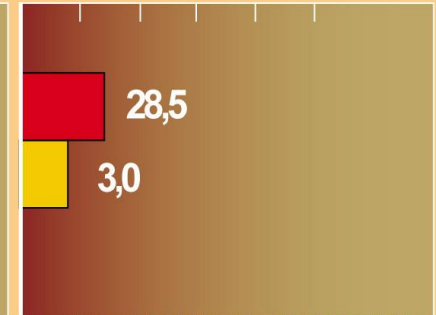
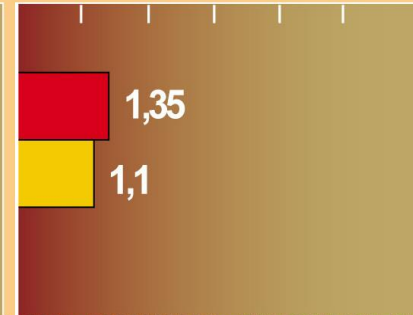
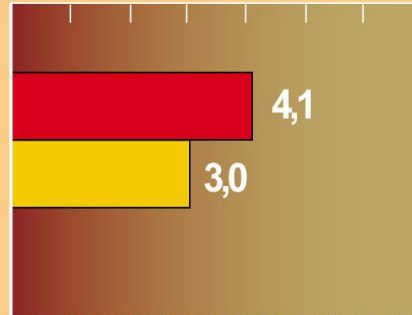
Saturation
base %

0 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 6,0

0 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0

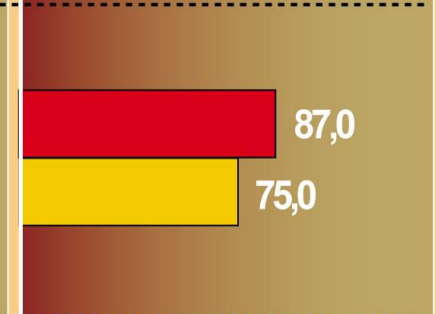
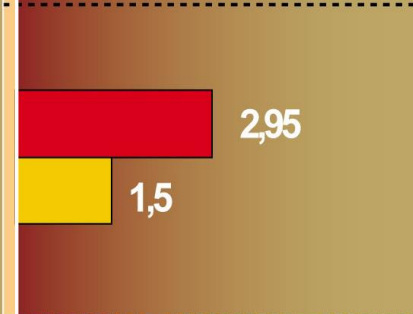
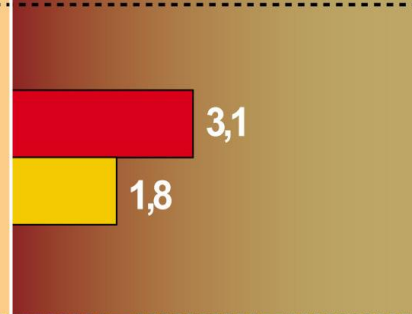
0 20 40 60 80 100

Sol originel
Latérite
Madagascar
(Hauts plateaux)



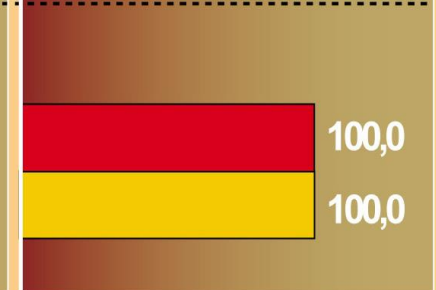
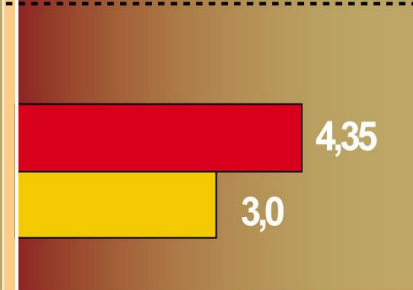
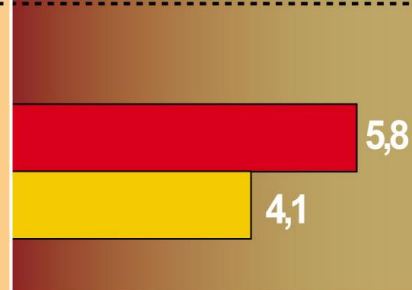
**5 années
de labour**

Alternance annuelle
Céréales/Haricots verts
+ (fertilisation)



**5 années
de semis direct**

Alternance annuelle
Céréales/Haricots verts
+ (fertilisation)

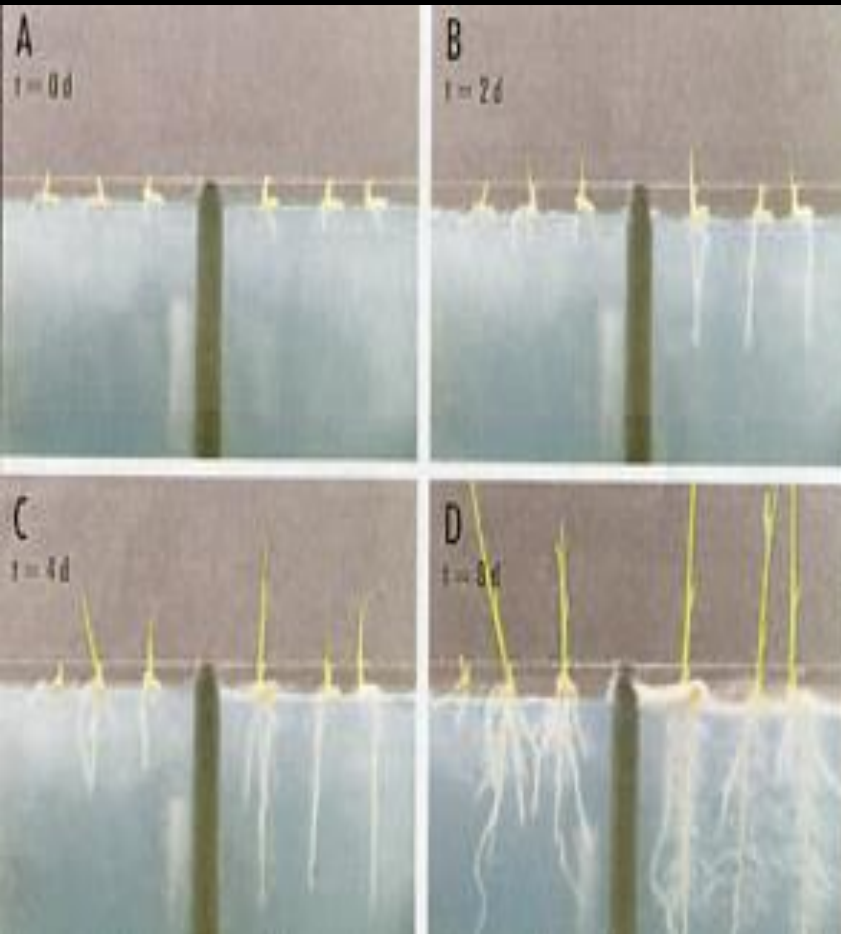


Horizon 0-10 cm



Horizon 10-20 cm

result: a greater root & stem growth and increase in biological activity(microbes, fungi, phytohormones..)



- Base saturation 100%
- Increase of CEC(5meq/100g)
- Better nutrients absorption



Improved crop performance

- Yield crop increase up to 5 times (8 to 12 t/ha/yr for rice in Madagascar instead of 2t)

from Uphoff and al.2010

Ampleur des pertes et gaspillages :

Un tiers des aliments produits pour la consommation humaine, soit **1,3 milliards de tonnes** (FAO, 2011)

➤ Variable selon produits :



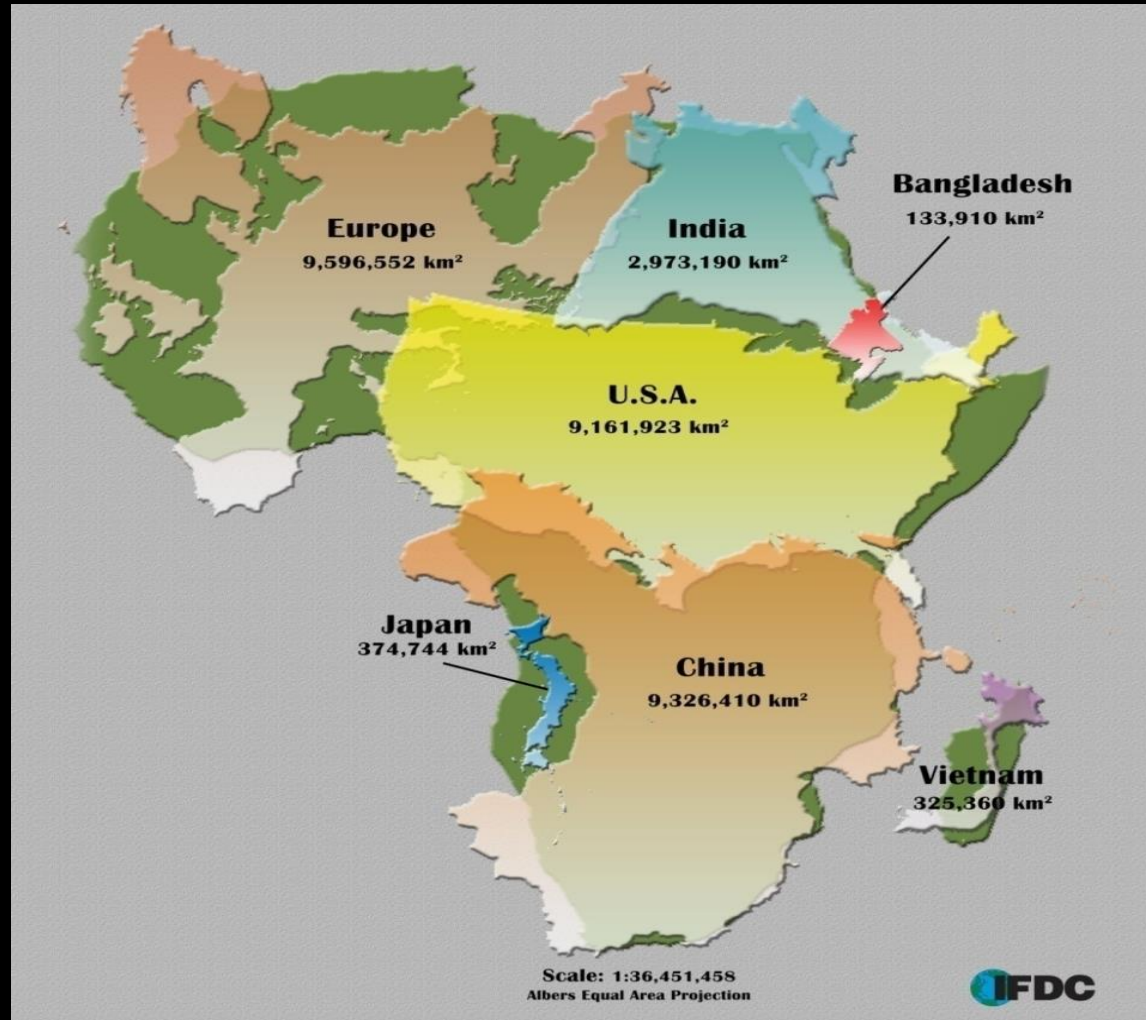
NB : Pertes et gaspillages au sens (FAO, 2013) =

Biens agricoles initialement destinés à la consommation humaine mais retirés de la chaîne alimentaire humaine, y compris quand elle fait l'objet d'une réutilisation non alimentaire (aliments pour animaux, bioénergie, fertilisant, etc.).

CONTENIR LA CROISSANCE DEMOGRAPHIQUE PAR L'EDUCATION



L'Afrique porte les terres promises de l'agriculture



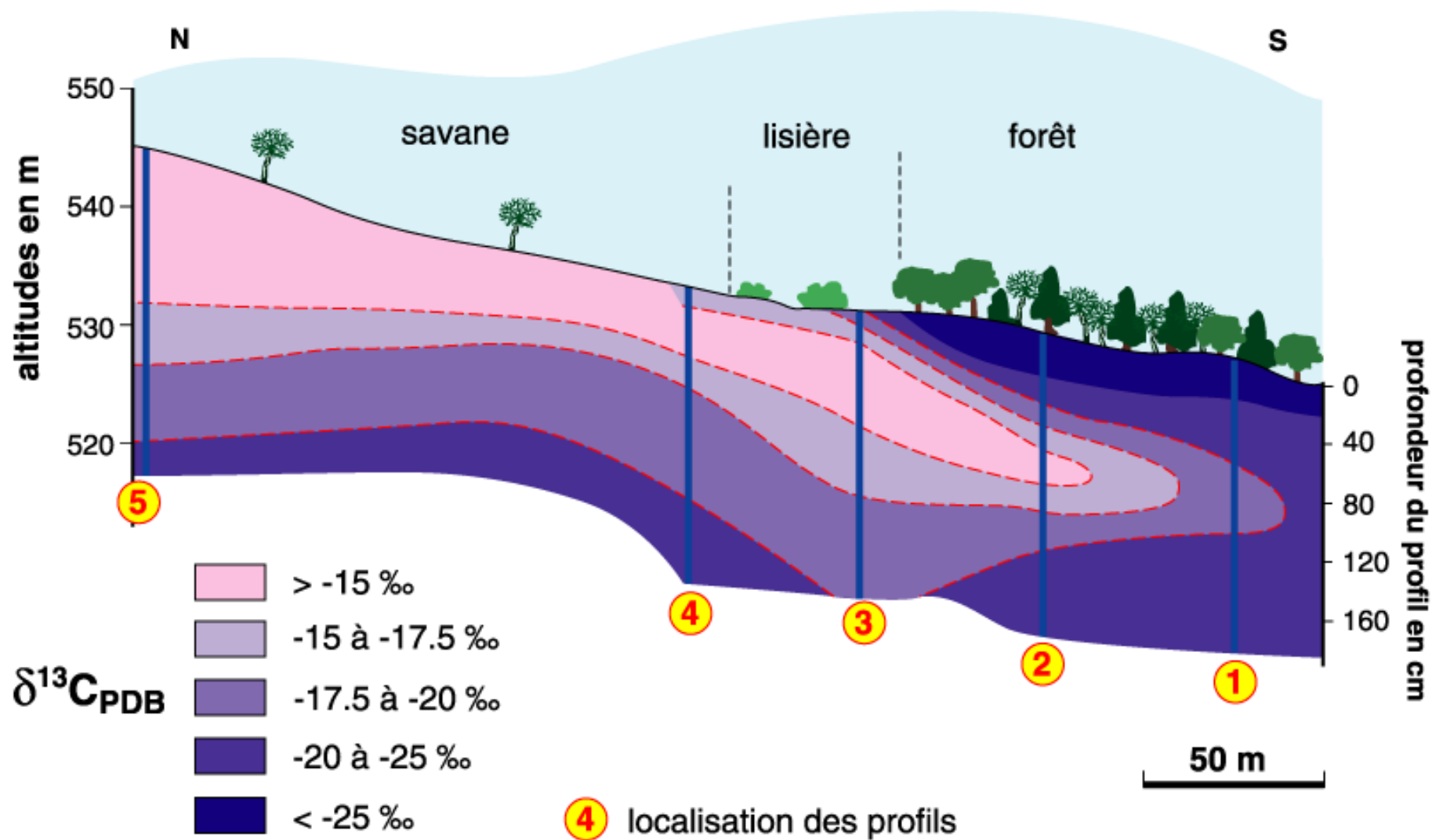


Nous aurons toujours des idées pour nous en sortir

- Produire 1kg de protéines animales nécessite 3 à 10 fois le poids en protéines végétales et produire 1kg de protéines végétales requiert 1000 à 15000 litres d'eau



0,6 à 0,9% de la couverture forestière disparaît chaque année: 10 à 14 millions hect

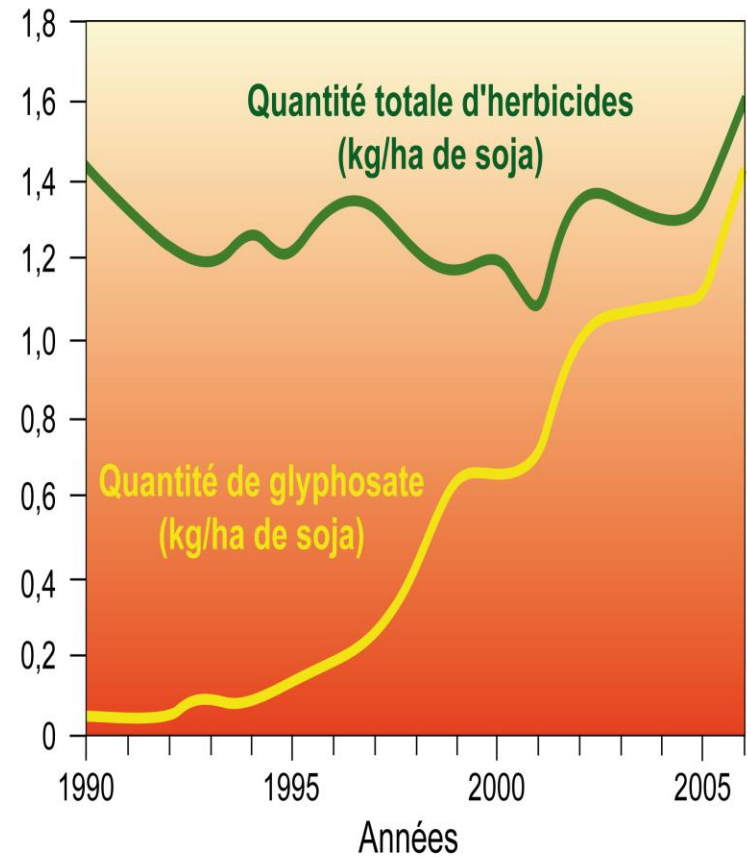


Faut-il avoir peur des OGM?

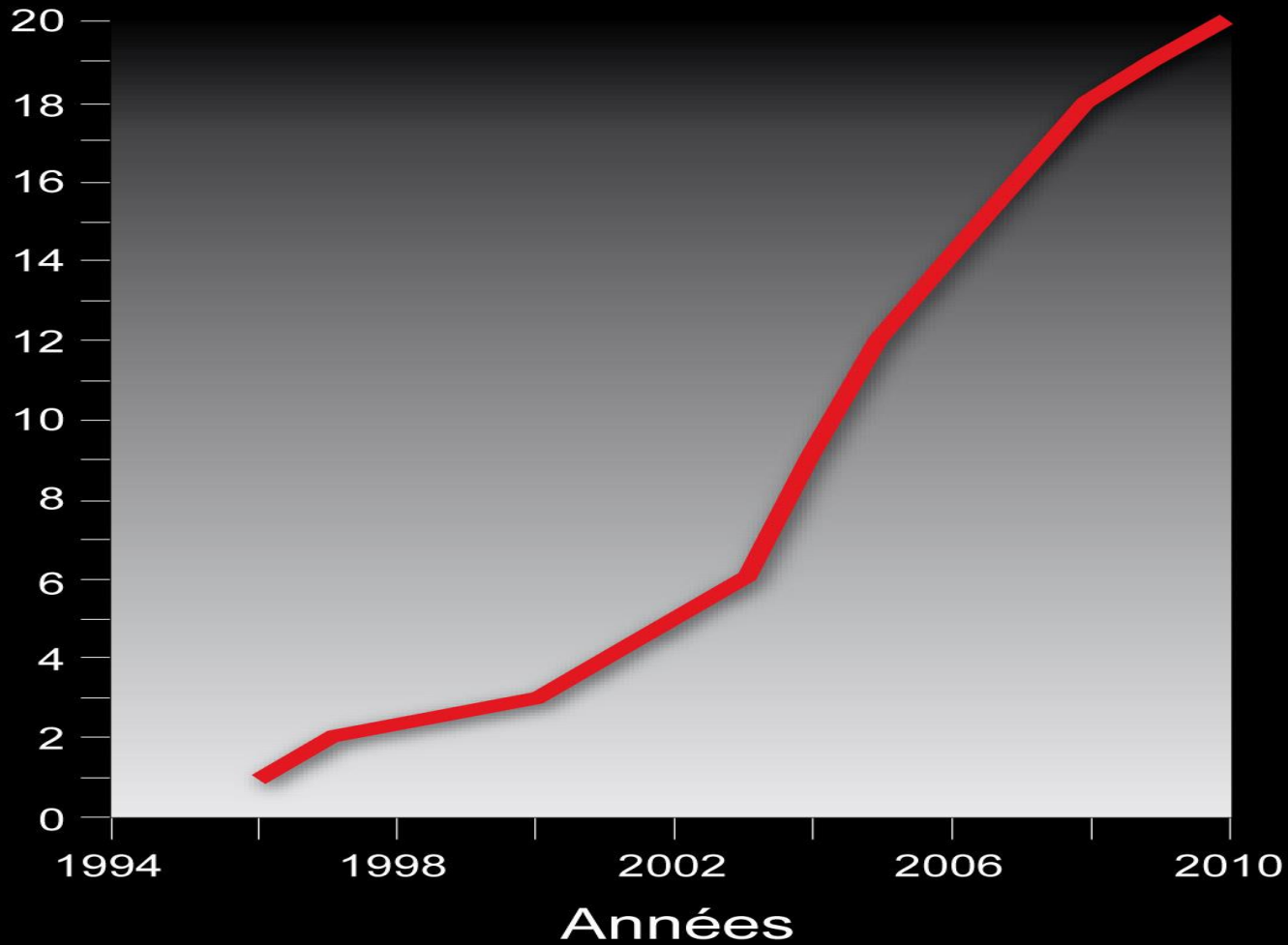


Soja au USA

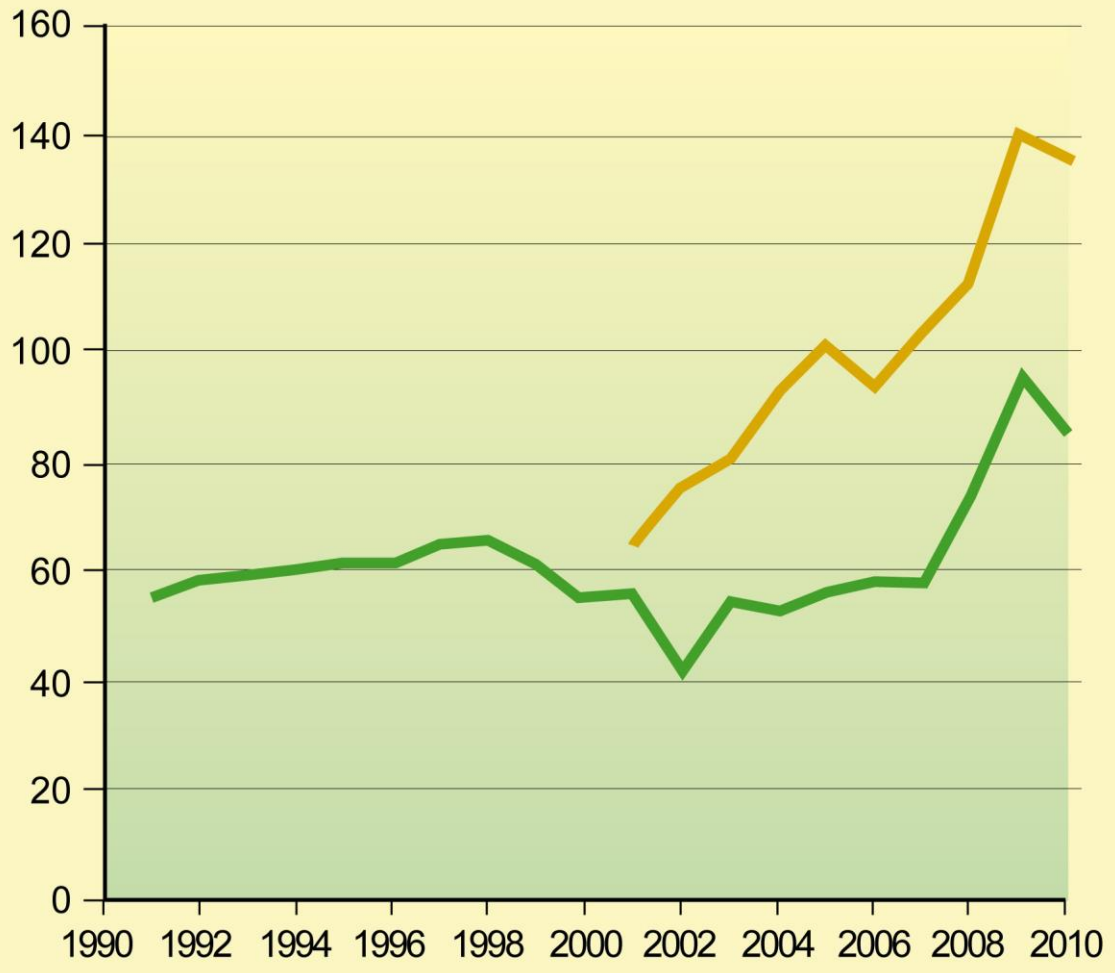
Quantité d'herbicides (kg/ha)



Nombre cumulé de mauvaises herbes devenues résistantes au glyphosate



Prix (dollar/ha)



Coût des semences
Génétiquement Modifiées / ha

Coût des semences non
Génétiquement Modifiées / ha

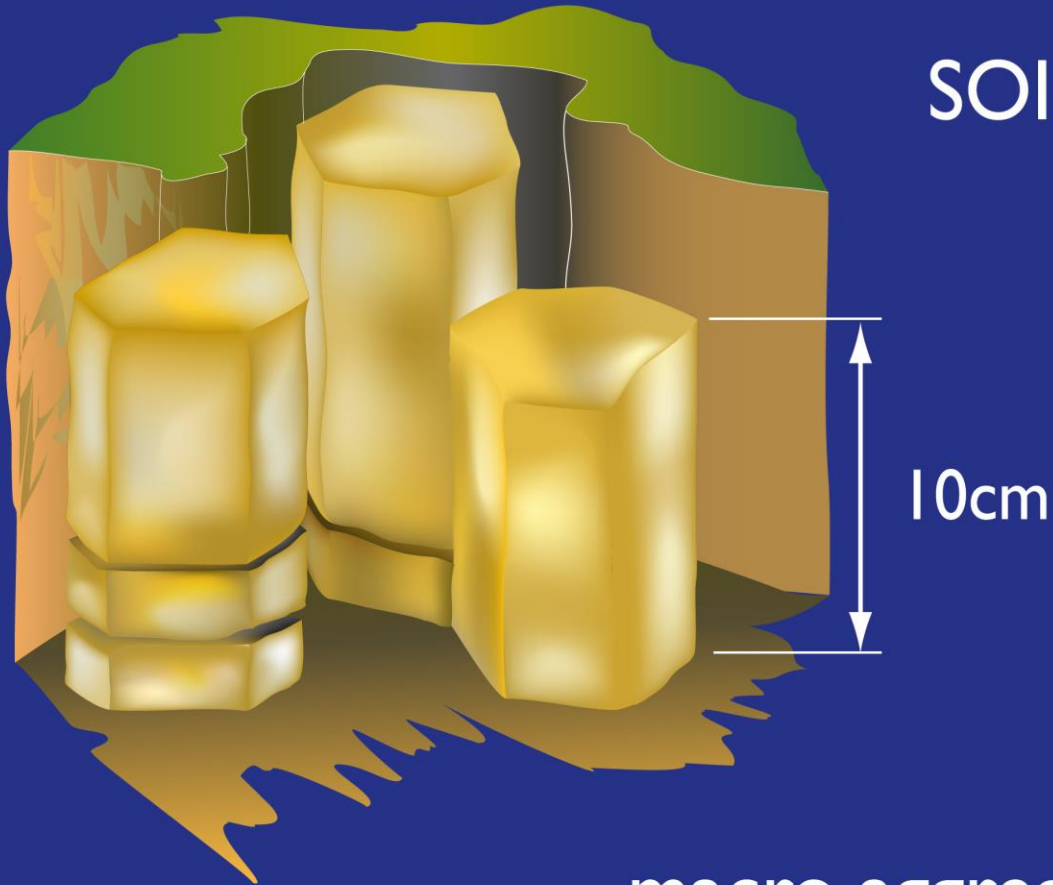
Années

- **Pour combattre les maladies et ravageurs:**
- Diversification des cultures, allongement des rotations et alternances dans les cultures avec espèces différentes de type légumineuse dans les céréales,
- Culture en mélange de plusieurs variétés présentant des gènes de résistance différents
- Revenir à des parcelles de taille raisonnable
- Modifier les dates et la densité des semis
- Améliorer les variétés résistantes sans cesse face à l'adaptation des ravageurs à ces résistances...

- Les techniques des transferts de gènes doivent être réservées:
- À l'amélioration des qualités nutritives (déficience en provitamine A; en fer..)
- À la diminution de l'azote chimique (rendre les plantes photosynthétique à l'azote de l'air)
- À adapter les végétaux aux sols salés, à la sécheresse, au froid, à économiser l'eau, à capter plus de CO² (augmentation des terres à cultiver)

LÀ EST LE PROGRÈS!

SOIL STRUCTURE



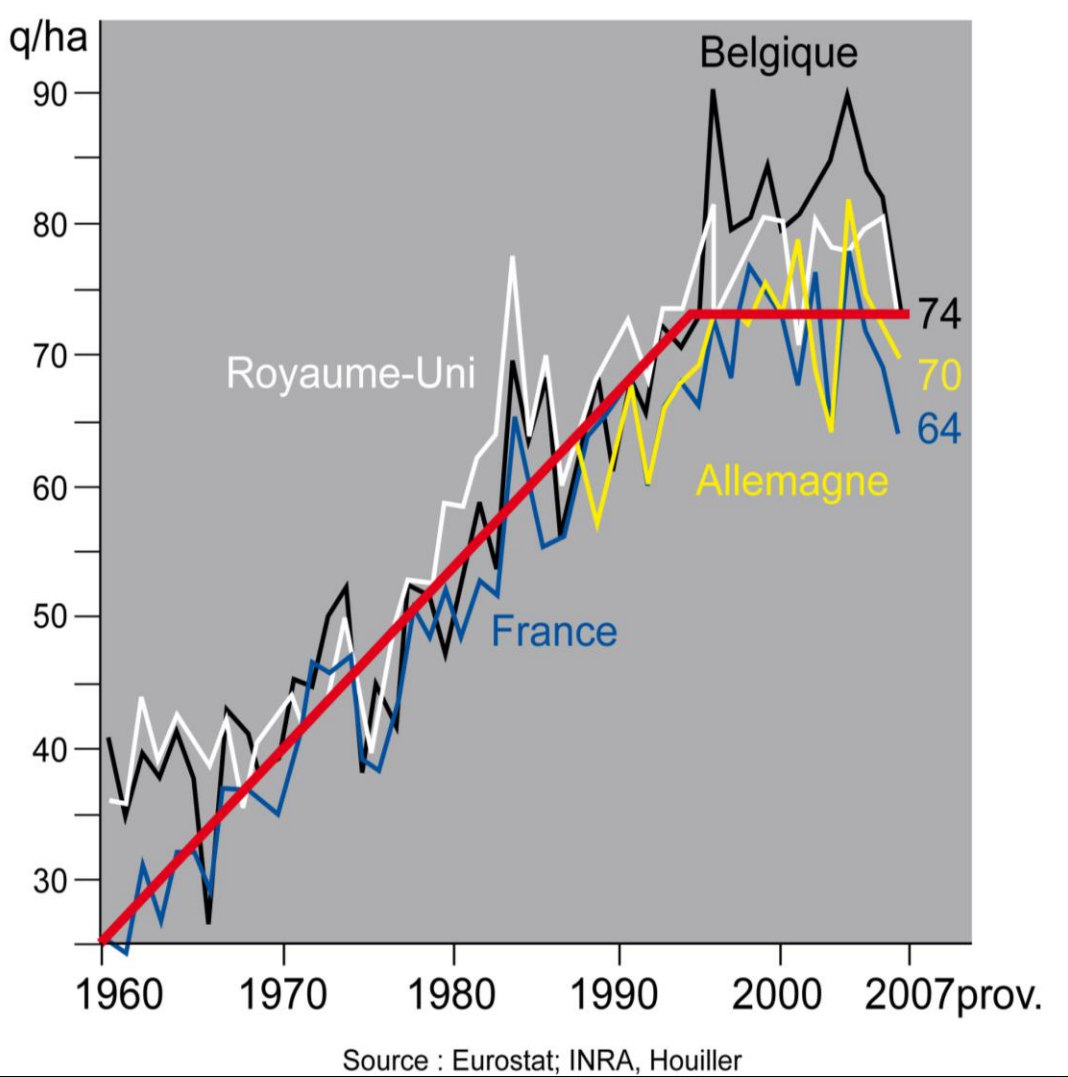
10cm

macro aggregates



La terre se ride de sillons ensemencés,
Irrigués désormais sous toutes latitudes

Wheat Yields stagnation in Europe the last twenty yrs



After one century of intensive agriculture...

- Does not feed one human being out of seven
- Produces one obese person out of ten
- Small farmholders cannot provide for their own livelihood and many commit suicide
- Consumes 4 times more energy than industry
- Uses 86% of the freshwater(failing water tables and severe decrease of rivers flow)
- Damages environment and farmer's health
- **Impoverishes soils and biodiversity**

Urbanization

Beginning XXth century

14% of the World
population living in
Cities

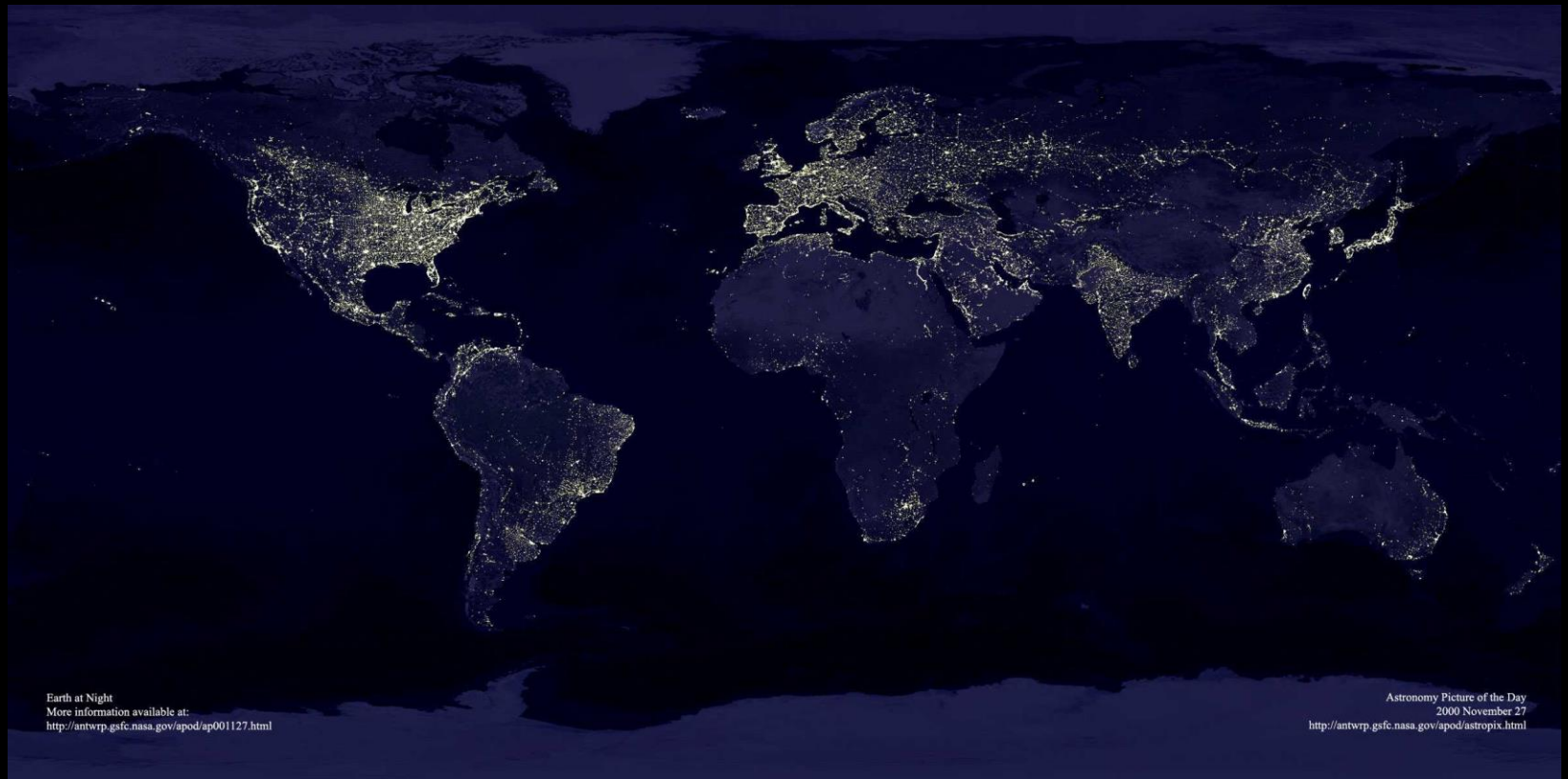
Beginning XXIth century

54% of the World
population living in
Cities

As we get older,
we start to forget things...

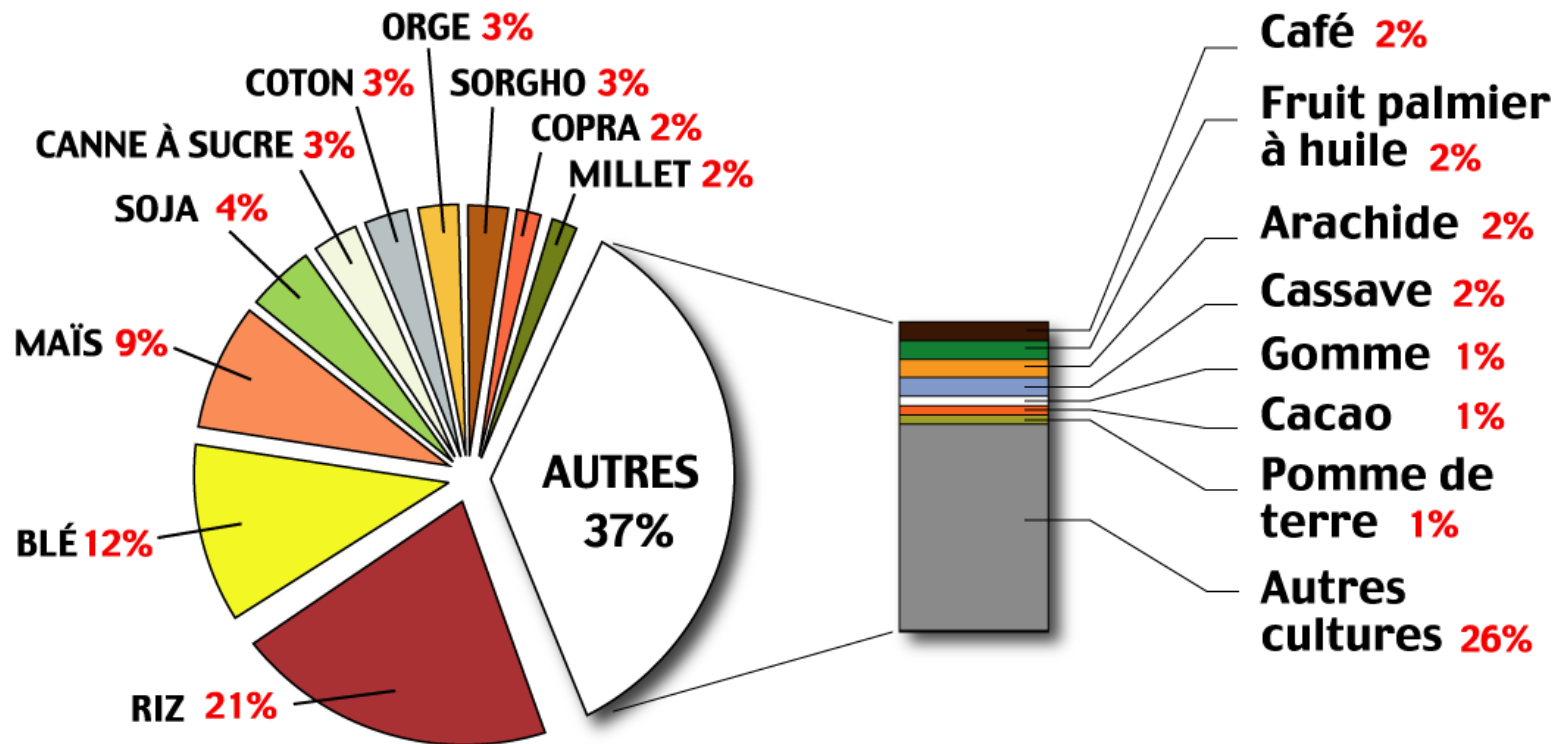


CHINE production d'électricité augmente 10% par an, INDE 6%
Ces 2 pays installent tous les 2 ans une capacité de production annuelle de la France



Dans 30 à 40 ans la consommation énergétique mondiale passera de 10 Gtep à 25 Gtep/an

EAU UTILISÉE POUR LA PRODUCTION GLOBALE



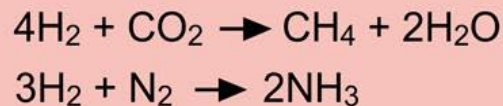
Les terres polluées ne sont plus arables



PLUIE DILUVIENNE
TRÈS ACIDE

ATMOSPHÈRE

H₂O (90%)
CO, CO₂, CH₄
H₂O, N₂, NH₃



H₂S
CO₂

H₂S
CO₂

ALTÉRATION (H₂O acide)

olivine → serpentine + silice + H₂
serpentine → smectite Fe/Mg

RUISSELLEMENT

smectite + Fe⁺⁺ + Mg⁺⁺ + H₄SiO₄
HCN

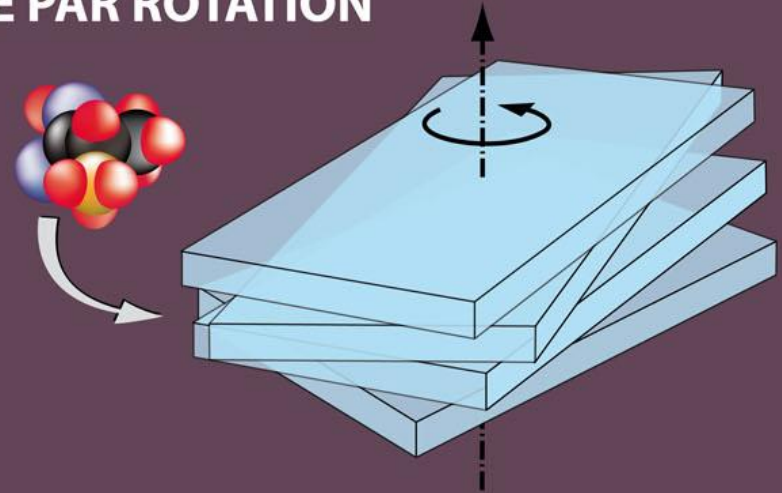
OcéAN

Fe⁺⁺
H₂S

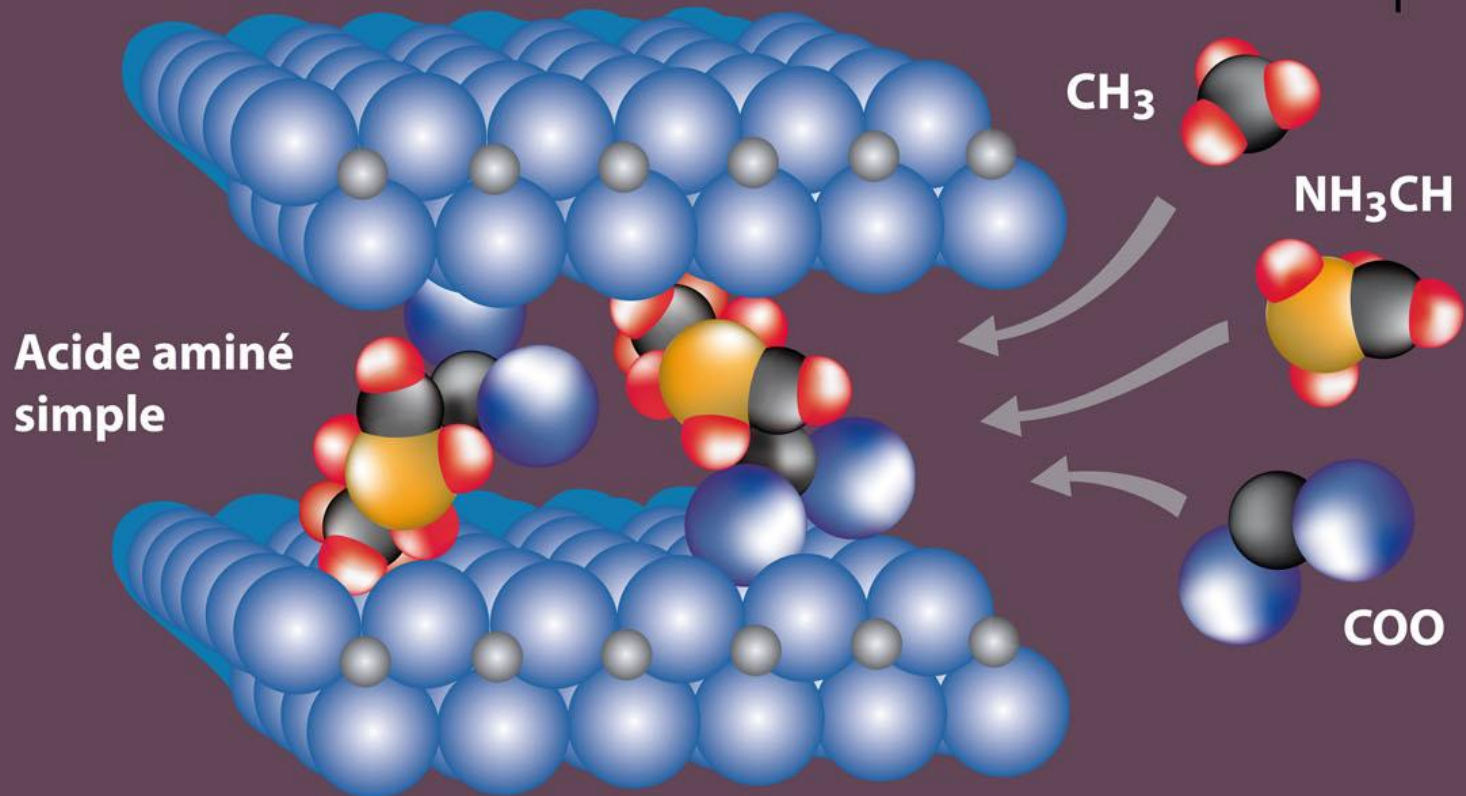
ALTÉRATION DE LA CROÛTE PRIMITIVE

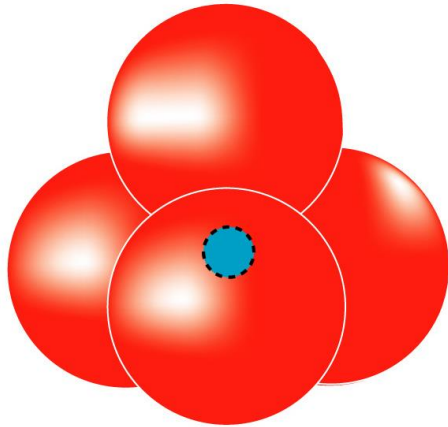
EMPILEMENT DES FEUILLETS D'ARGILE PAR ROTATION

ACIDE AMINÉ "L"

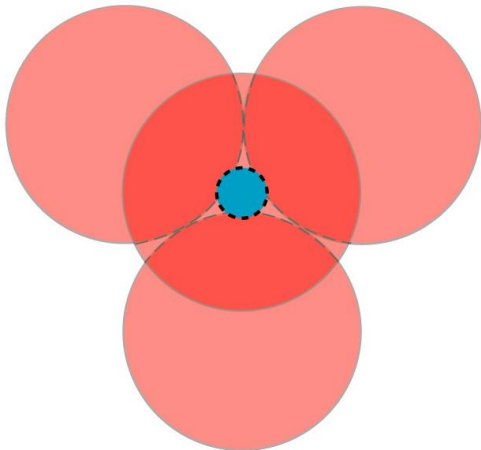


Smectite (argile à 2 couches)

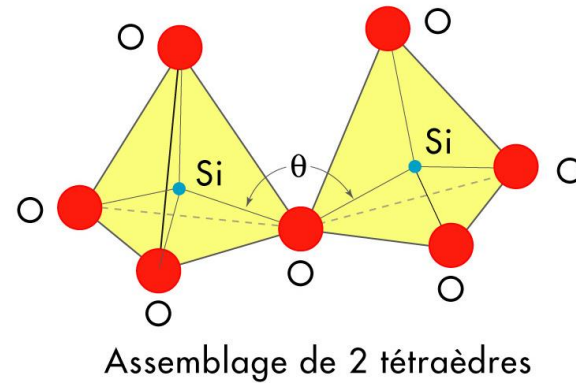
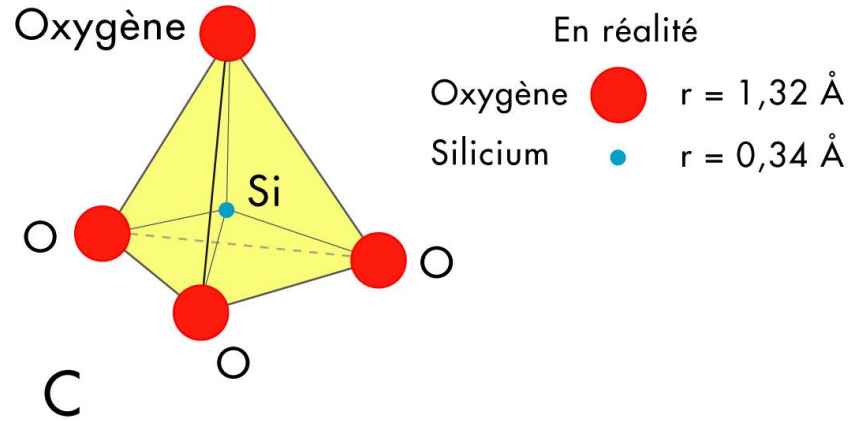




A

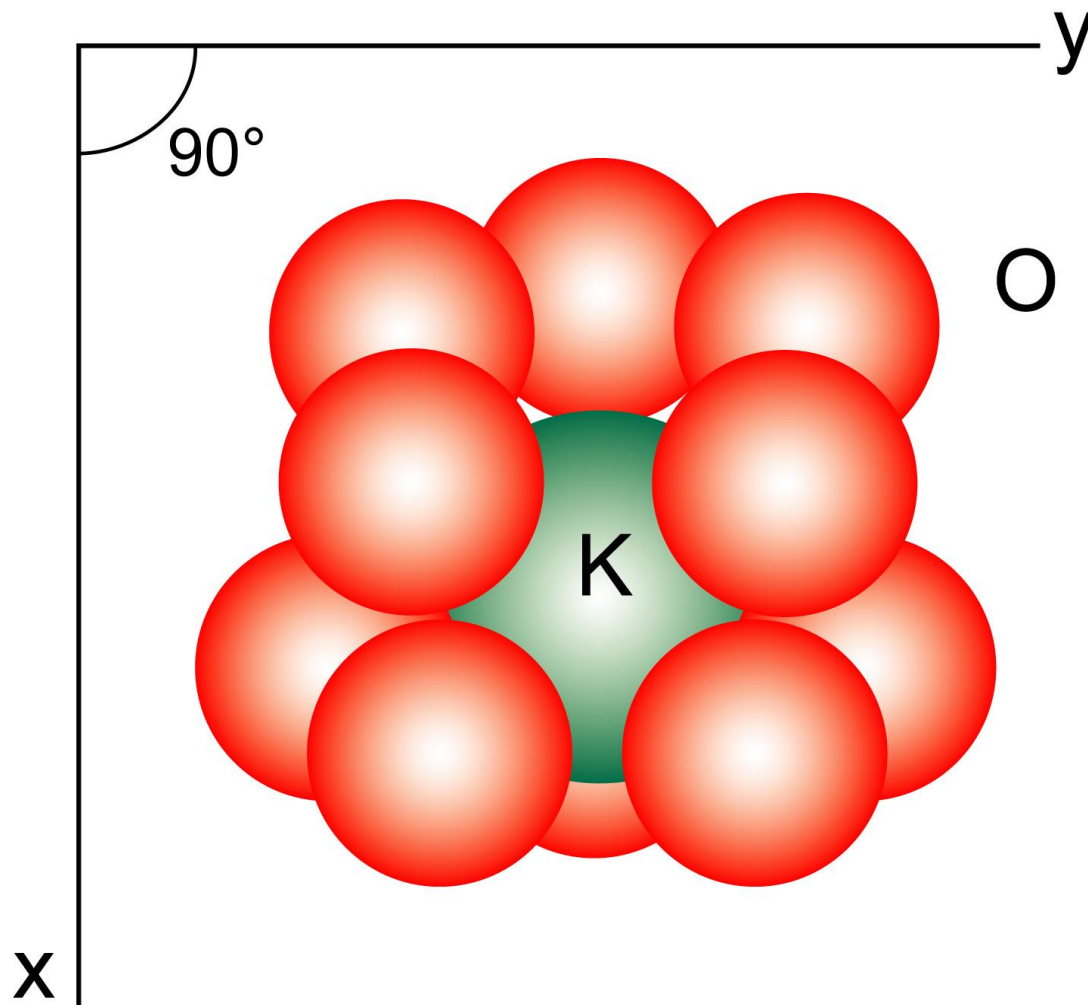


B



Minéraux = arrangements d'atomes dans l'espace

système monoclinique



Arrangement, autour du potassium K, d'atomes d'oxygène