

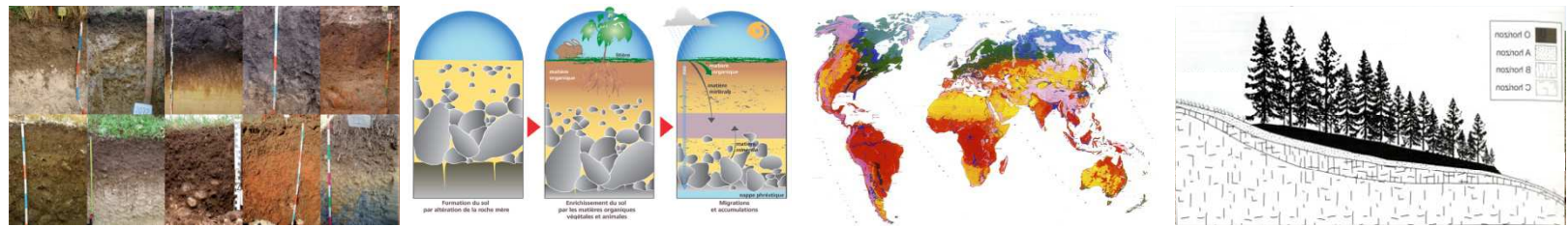
Les Sols : formation et distribution spatiale

David Montagne – Maître de Conférence AgroParisTech –
david.montagne@agroparistech.fr



-
-
-

Plan général de l'exposé

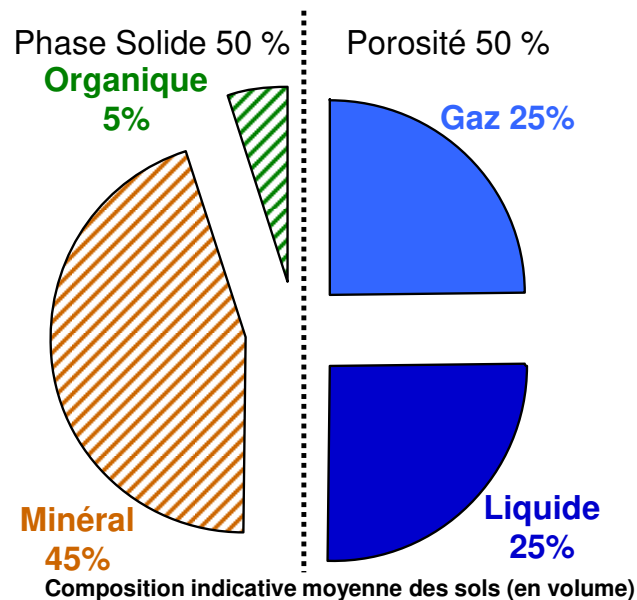


1. Introduction : De quoi parle-t-on ?
2. La formation des sols : principes généraux
3. Les Facteurs de la formation des sols

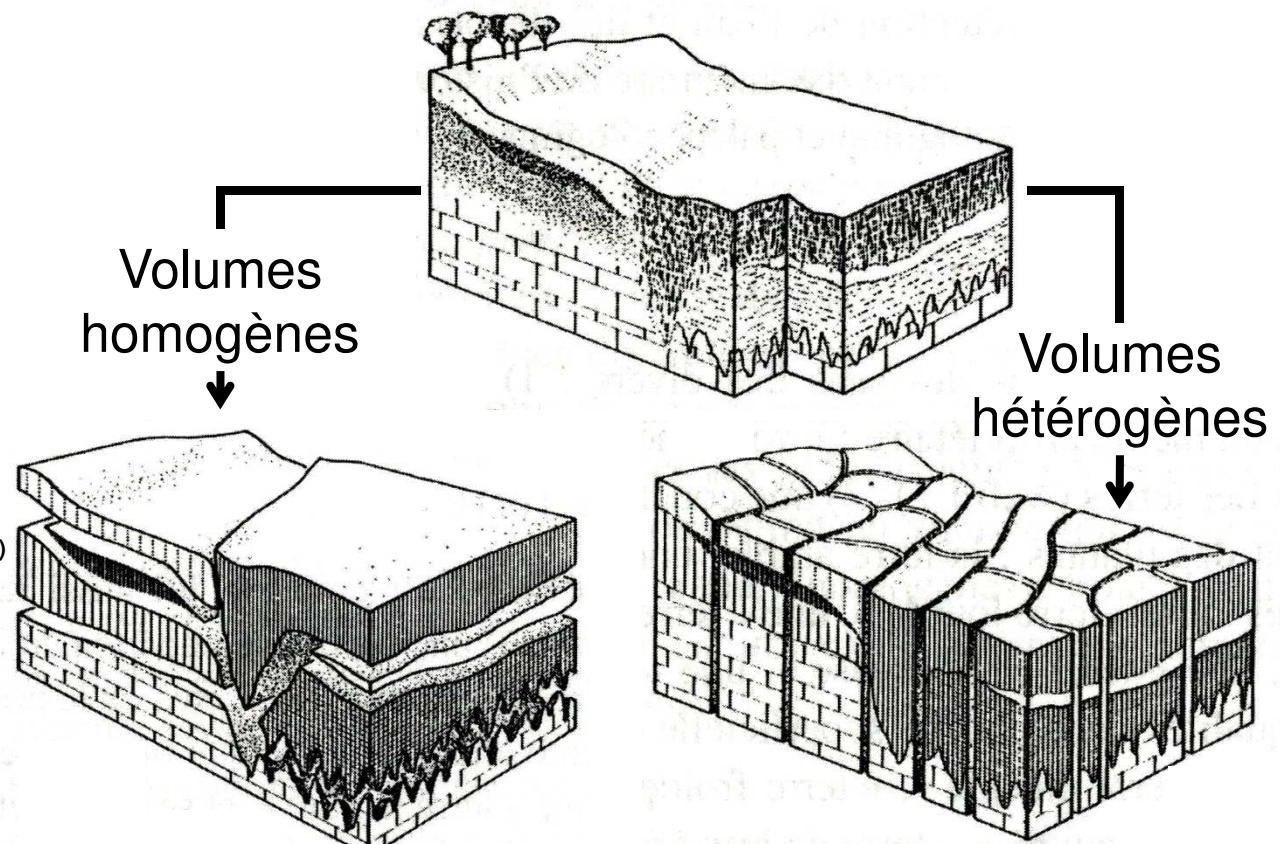
-
-
-

De quoi parle-t-on ? : couverture pédologique, horizon et sol

Un milieu **tri-phasique**



Une partie des écosystèmes **continue, tridimensionnelle: couverture pédologique**

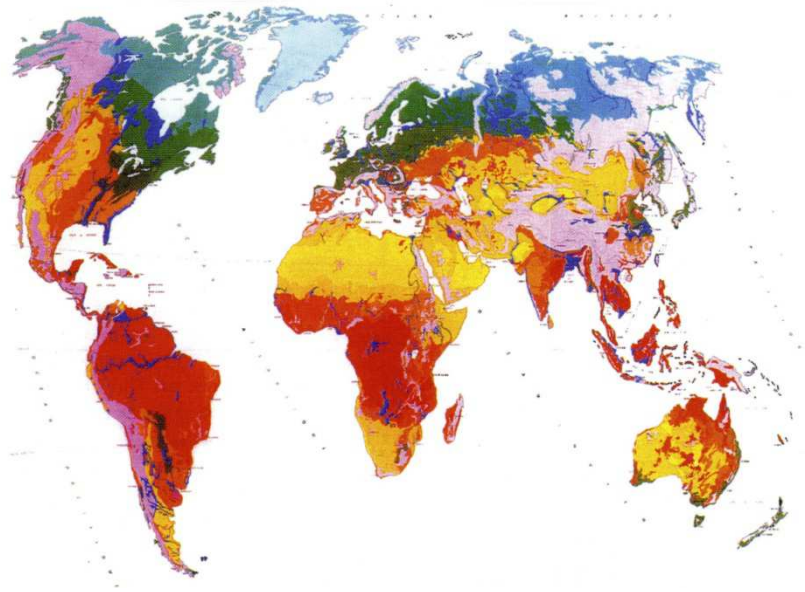


⇒ horizons

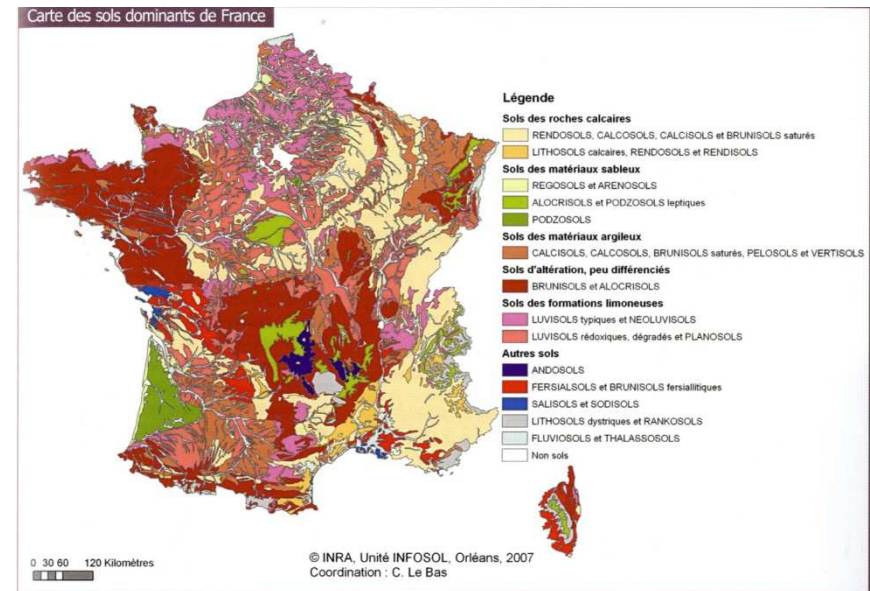
⇒ sol

-
-
-

De quoi parle-t-on ? : sol et pédogenèse



Carte des grands types de sols mondiaux (AFES, 1984) in Mathieu, 2009.



Carte des sols dominants de France (GIS Sol, 2011).

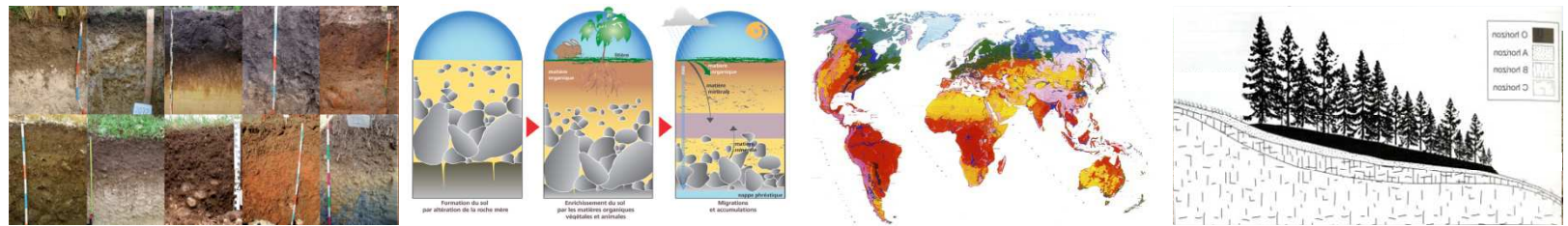
⇒ Une distribution spatiale **inéga**le de la ressource en sol

⇒ Une distribution spatiale **organis**ée, gouvernée par des **lois déterministes** : les lois de **la pédogen**èse

-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

2. Formation des sols : principes généraux

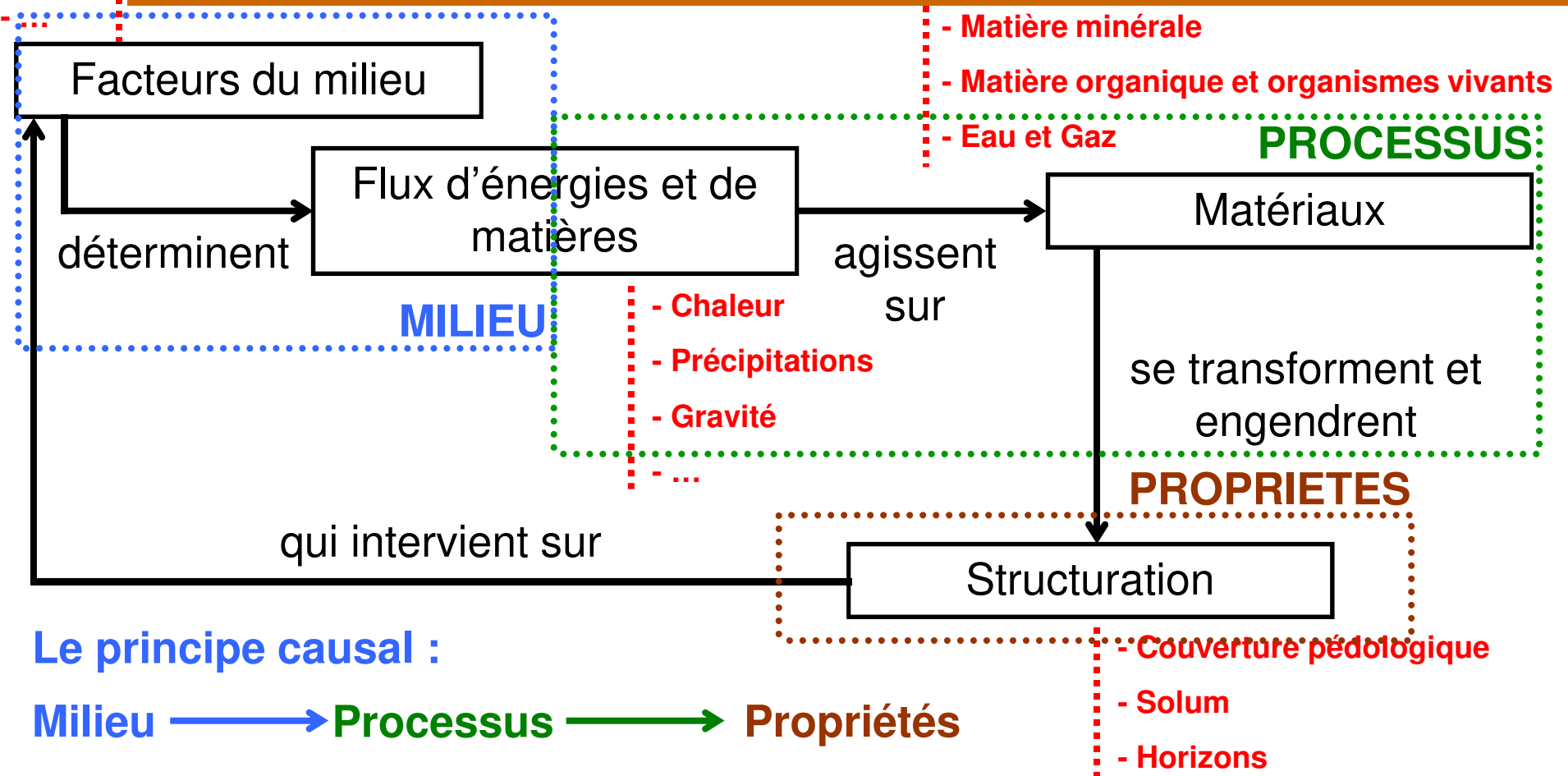


-
-
-
-
-
-
-
-
-

•
•
•

- Climat
- Relief

Principe général de la pédogenèse



Le principe causal :

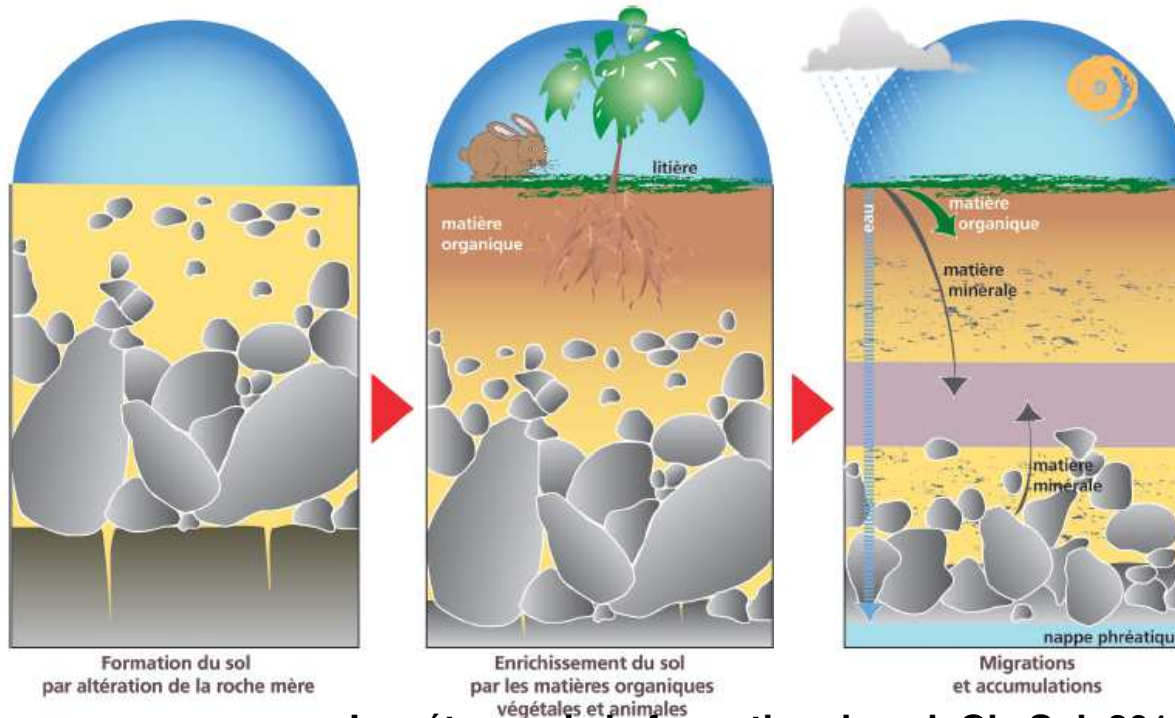
Milieu ———→ Processus ———→ Propriétés

Boucle de rétroaction ⇒ Un principe inscrit dans le TEMPS

• • • • •

-
-
-

Les 3 phases de la pédogenèse



Les étapes de la formation du sol. Gis Sol, 2011

1. Altération du matériau parental :

- Fragmentation physique
- Altération chimique

⇒ **Particules minérales de petite taille**

⇒ **Minéraux résistants à l'altération**

2. Enrichissement en matières organiques

- Intégration, Minéralisation, Humification

3. Structuration et Transports

⇒ **Formations d'horizons bien différenciés**

-
-
-

Phase 1 : L'altération, fragmentation physique

Les 3 agents de la fragmentation physique :

1. La **température** Dilatations/contractions différentielles entre zone **externe** et **interne** et/ou entre **différents minéraux**.

Accélération en cas de **gélifraction**

2. L'**abrasion** **Détachement** de particules sous l'action de l'**eau**, du **vent**, de la **glace**

3. Les **êtres-vivants** Expansion de fissures par les racines, activité de fouissage

⇒ **Diminution de la taille des particules**

⇒ **Conservation de la composition minéralogique mais augmentation de la charge spécifique et modification des conditions de milieux (porosité)**



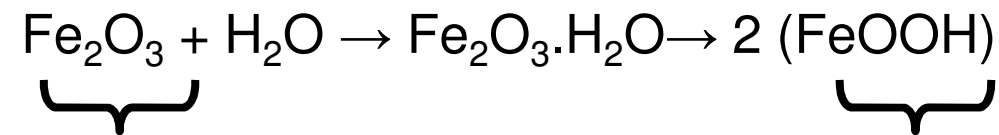
-
-
-

Phase 1: L'altération, altération biogéochimique

6 processus d'altération **d'intensité croissante** :

1. L'hydratation

Fixation d'une ou plusieurs molécules d'eau



Hématite

Goethite

⇒ augmentation du volume

⇒ légère modification minéralogique dans le sens d'une fragilisation des réseaux cristallins

⇒ **favoriser l'ameublissement du sol ainsi que les processus d'altération ultérieurs**

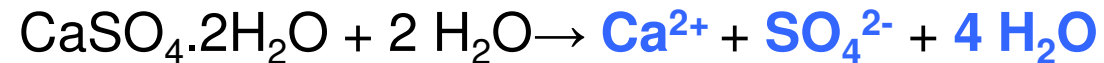
-
-
-

Phase 1: L'altération, altération biogéochimique

6 processus d'altération d'intensité croissante :

2. La dissolution

Hydratation des cations et anions d'un minéral jusqu'à leur dissociation dans l'eau



⇒ Agit sur la totalité des minéraux

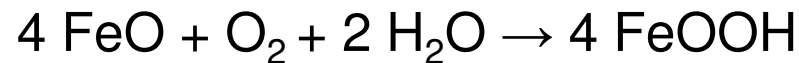
⇒ Plus particulièrement rapide pour les sels solubles : gypse, chlorure de sodium, sels de potassium,....

-
-
-

Phase 1: L'altération, altération biogéochimique

6 processus d'altération **d'intensité croissante** :

3. oxydation/réduction Oxydation de certains éléments chimiques (Fe, Mn, S,...) constitutifs de certains minéraux (sulfures, silicates,...) sous l'action de l'oxygène de l'air ou d'eaux chargées en oxygène



Fe(II)

Fe(III)

⇒ Modification de la valence et du rayon ionique

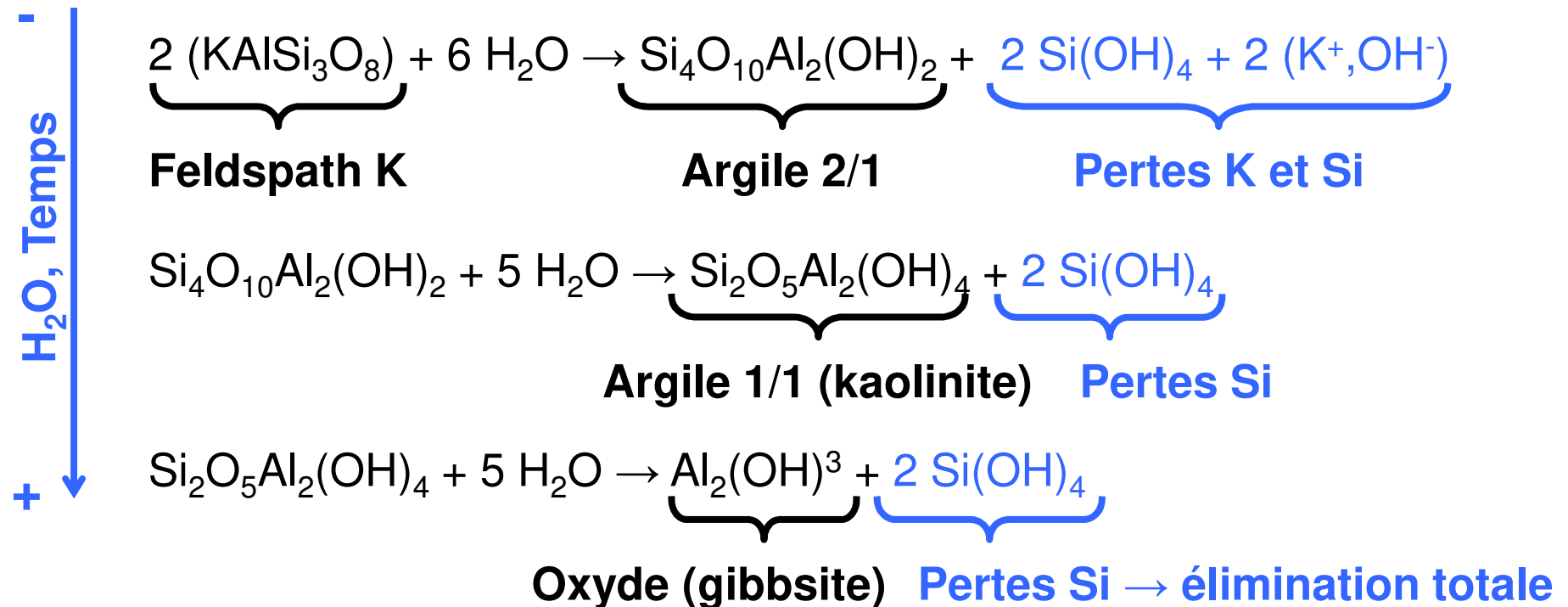
⇒ **Déstabilisation/fragilisation du réseau cristallin des minéraux**

Phase 1: L'altération, altération biogéochimique

6 processus d'altération d'intensité croissante :

4. L'hydrolyse

Remplacement des cations de la structure des minéraux par les ions H_3O^+ provenant de la dissociation de l'eau

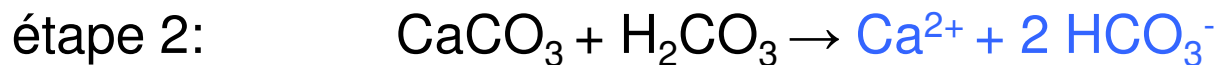


-
-
-

Phase 1: L'altération, altération biogéochimique

6 processus d'altération **d'intensité croissante** :

5. L'hydrolyse acide Hydrolyse favorisée par la présence d'acides minéraux dans la solution des sols



⇒ Réaction à la base du processus de décarbonatation

⇒ De nombreuses sources d'acidité dans les sols : dépôts atmosphériques, réactions d'oxydation, cycles biogéochimiques

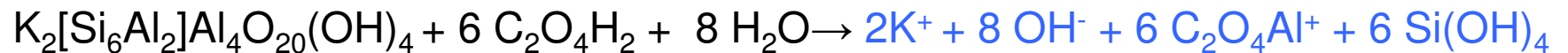
-
-
-

Phase 1: L'altération, altération biogéochimique

6 processus d'altération d'intensité croissante :

6. L'acido-complexolyse

Complexation des cations et notamment de Fe^{3+} et Al^{3+} par des ligands organiques



muscovite

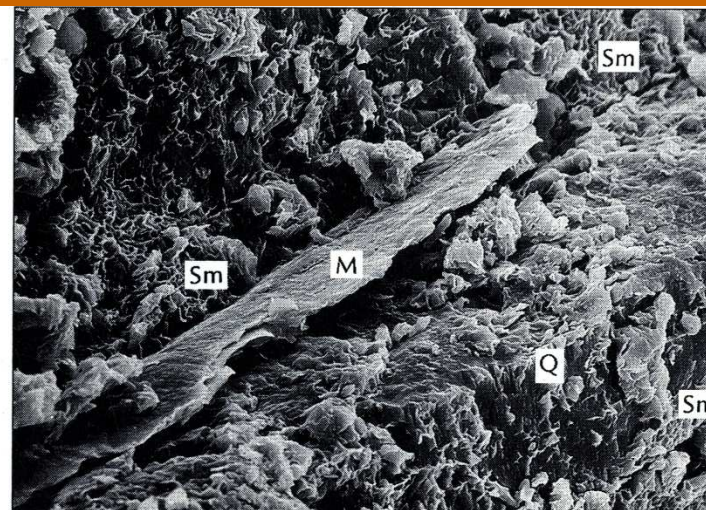
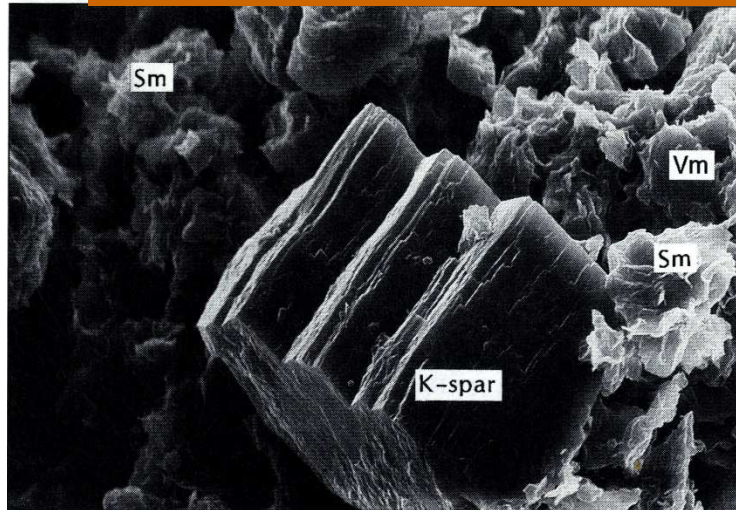
Acide
oxalique

⇒ Le plus souvent, l'altération biogéochimique d'un sol résulte de la combinaison simultanée de plusieurs mécanismes élémentaires

-
-
-

Phase 1: l'altération, illustrations

MINERAL



Hydrolyse d'un feldspath potassique (à gauche) et d'un mica (à droite) et formation de minéraux argileux de type smectites (Sm) ou vermiculite (Vm). Microscopie électronique (Brady and Weil, 2002)

AGREGAT



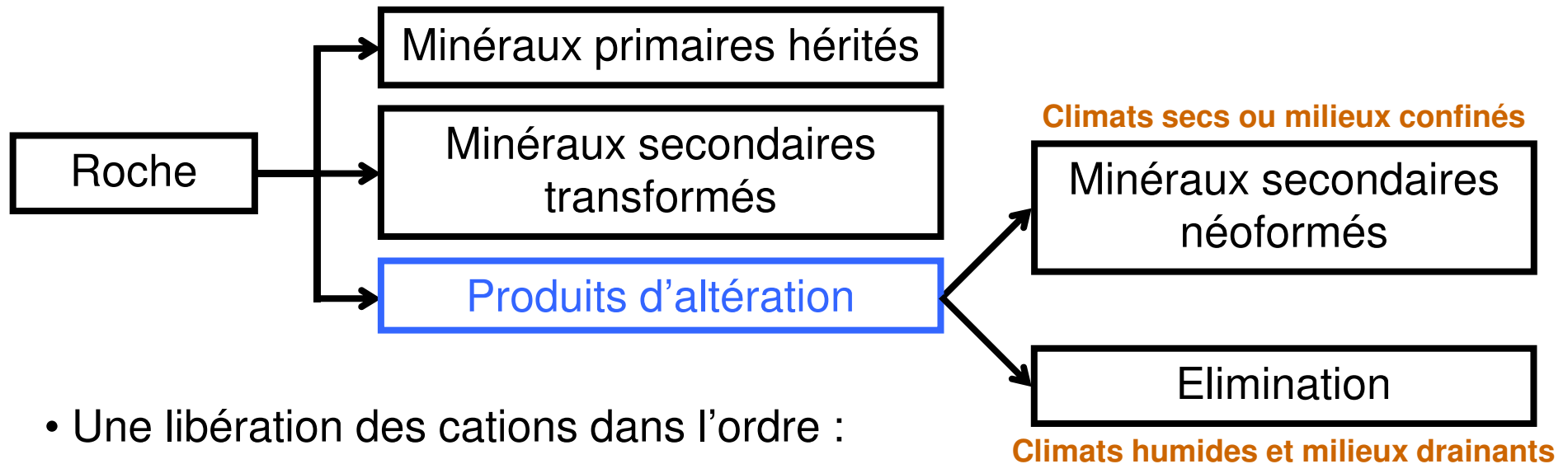
Altération d'un granite (à gauche) et d'un calcaire dure (à droite). J. Michelin

-
-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

Phase 1: l'altération, bilan

- bilan général de l'altération :



- Une libération des cations dans l'ordre :

1- cations alcalins : (Na^+ , K^+)

2- cations alcalino-terreux : (Ca^{2+} , Mg^{2+})

3- Si, Fe, Al

⇒ Diminution de la taille des particules → fraction $< 2\mu\text{m}$ dite « argile »

⇒ Simplification de la minéralogie → minéraux résistants (oxydes Al et Fe)

-
-
-

Phase 2 : Intégration des matières organiques

Les sources de matières organiques

- Les **débris végétaux** : feuilles, fruits, brindilles, aiguilles, écorces, ...

- Les **débris animaux** : crottes, ...

- Vache = 25 à 30 kg.jour⁻¹.m⁻²

- Éléphants = 550 kg.ha⁻¹.an⁻¹

- Chenilles du bombyx disparate = 400 à 1 000 kg.ha⁻¹.an⁻¹

- Litière **souterraine majoritaire**

- Racines (jusqu'à 85% de la production primaire nette totale)

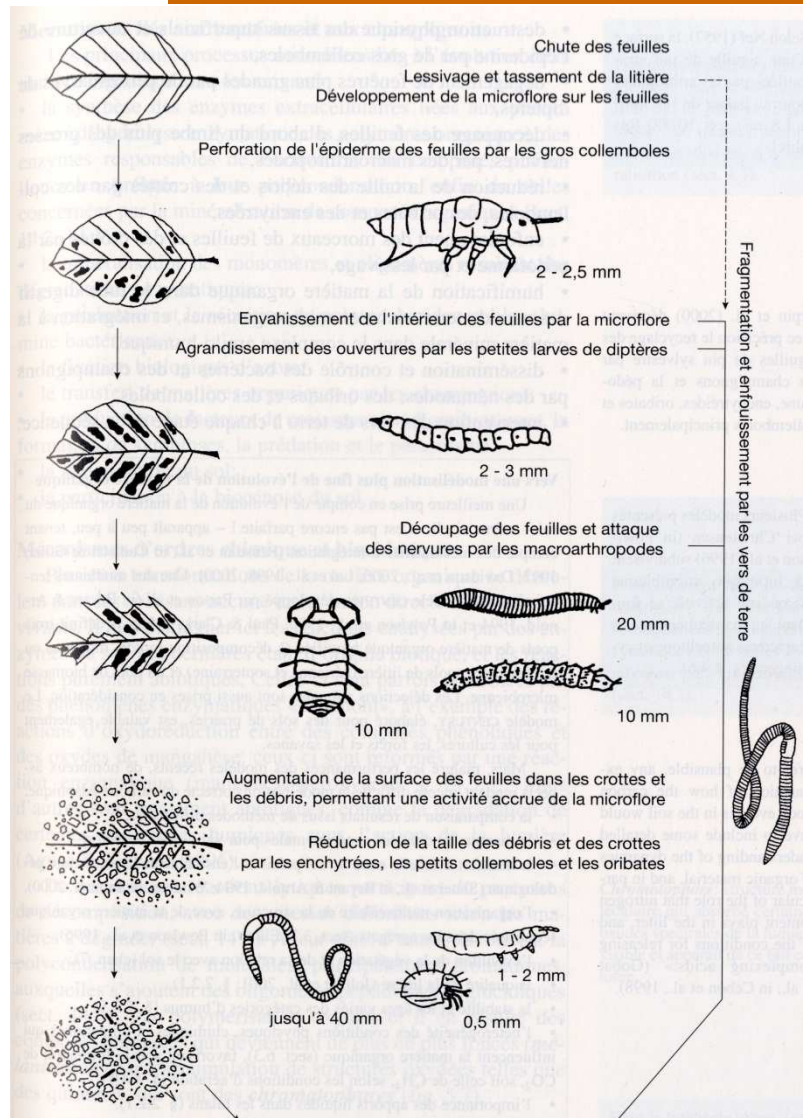
- Exsudats racinaires (entre 20 et 50% du Corg fourni au sol, 66,5 kg.ha⁻¹.an⁻¹ pour le pin maritime de l'Alaska, *Pinus contorta*)

- De nombreux composés industriels volatils : HAP, produits phytosanitaires,...

Végétation	Chute annuelle de litière aérienne (t/ha.an)
Toundra arctique et alpine	1,0 - 4,0
Toundra arbustive, fourrés	2,5 - 5,0
Forêt boréale d'épicéa	3,5 - 7,5
Forêt tempérée caducifoliée	11,0
Savane	9,5
Semi-désert	0,6 - 1,1
Forêt tropicale et équatoriale	20,0 - 40,0
Prairie tempérée	7,5
Cultures, agroécosystèmes	0,3 - 2,0
Zones marécageuses	5,0 - 35,0

Chute annuelle de litière aérienne de quelques formations végétales. Gobat et al.. 2003

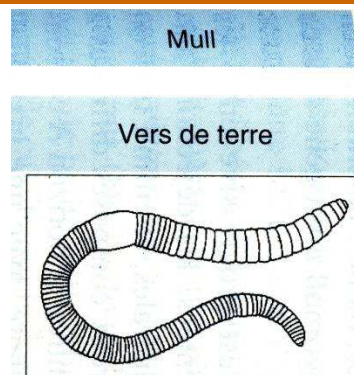
Phase 2 : Intégration des matières organiques histoire d'une feuille



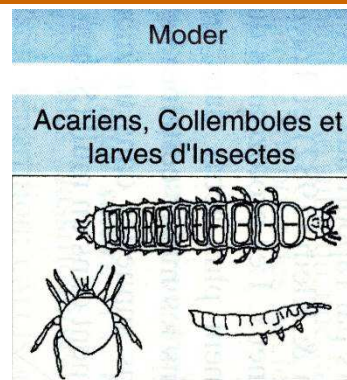
- Lessivage, tassement, développement microflore sur les feuilles
- Perforation de l'épiderme (collemboles), microflore dans l'intérieur des feuilles
- Agrandissement des ouvertures par larves de diptères
- Découpage des feuilles et attaque des nervures par macroarthropodes
- Réduction de la taille des débris et crottes par enchytrées, petits collemboles et oribates
⇒ activité accrue de la microflore
- Enfouissement et mélange à la matière minérale par les vers de terre à chaque étape

-
-
-

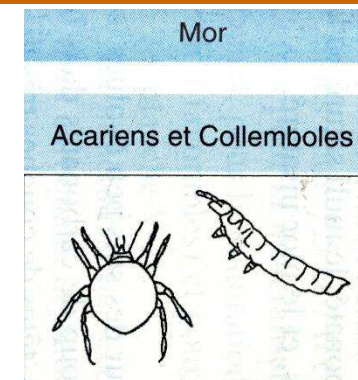
Phase 2 : Intégration des matières organiques Entre la vie et le sol : les formes d'humus



**Horizon A grumeleux
Succession OL/A**



**Horizon A non grumeleux
Succession OL/OF/(OH)/A
Transition O/A progressive**



**Succession OL/OF/OH/A
OH épais
Transition O/A nette**

-
-
-

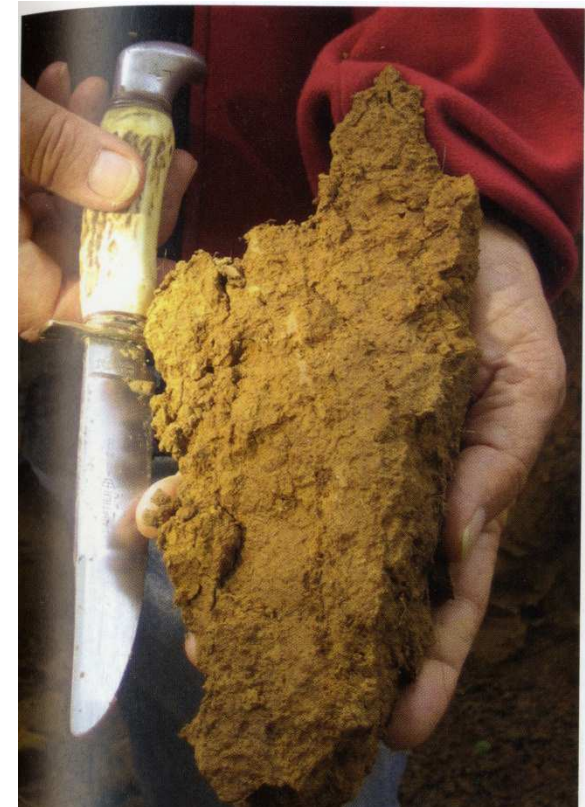
Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

1. Définition de la structure:

La **structure** est le résultat des **interactions** entre constituants **minéraux et organiques** et de leur capacité à **s'associer**.

Elle se manifeste par une **organisation tridimensionnelle** des particules élémentaires en volumes appelés **agrégats** séparés par des **surfaces de moindres résistances**

Elle caractérise, **en négatif**, l'organisation des **vides** à l'intérieur du sol et donc la localisation des **principaux flux** au sein des sols



Agrégat issu d'une structure prismatique. Girard et al., 2011

-
-
-

Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

2. Les mécanismes de la structuration :

2.1. Les phénomènes chimiques

- Force électrostatiques $\Rightarrow$ **importance de l'abondance des minéraux argileux et des matières organiques (chargées négativement)**

$\Rightarrow$ **nécessité de la présence d'ions compensateurs plurivalents (Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} ,...)**

2.2. Les phénomènes physiques

- Gravité
- Cycles d'humectation / dessiccation
- Cycle gel / dégel
- Travail du sol / tassement

$\Rightarrow$ **À l'origine de faces planes**



Sol craquelé par la sécheresse, Guyanne française. Inra, 2009

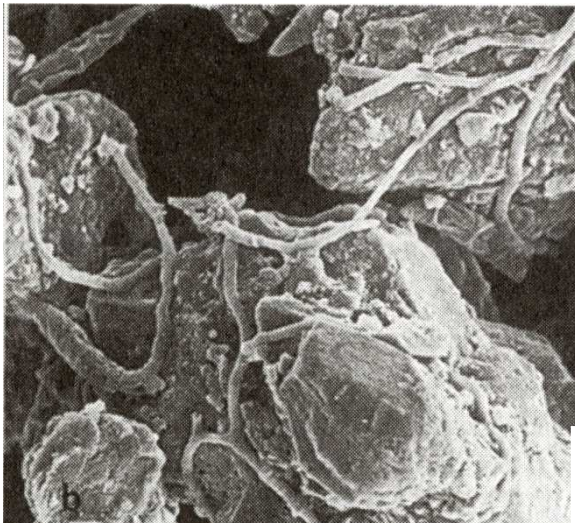
-
-
-

Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

2.3. Les phénomènes biologiques

- Construction de structures biogéniques (ingénieurs de l'écosystème)
- Agrégation par emballage (filaments mycéliens, systèmes racinaires,...)
- Production de « ciments » organiques

⇒ À l'origine de faces arrondies



Filaments mycéliens enserrant des particules. Girard et al., 2011



Australie, Montagne 2007

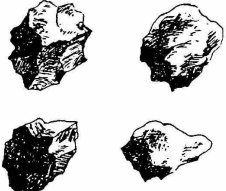
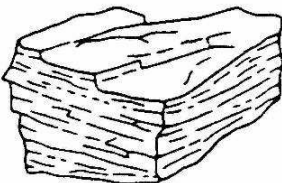
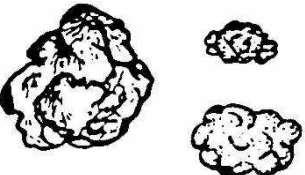
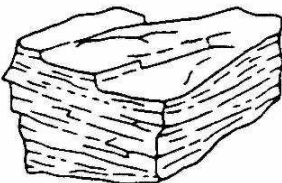


Turricules de vers de terre. Girard et al., 2011

-
-
-

Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

3. Les principaux types de structure :

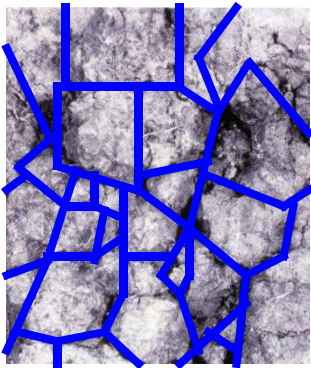
AVEC AGREGATS				SANS AGREGATS
Arrondies	Anguleuses			particulaires
	Angles vifs	Allongement vertical	Allongement horizontal	
 Grenue				massive
 Grumeleuse	 Polyédrique	 Prismatique	 Lamellaire	
				• • • •

-
-
-

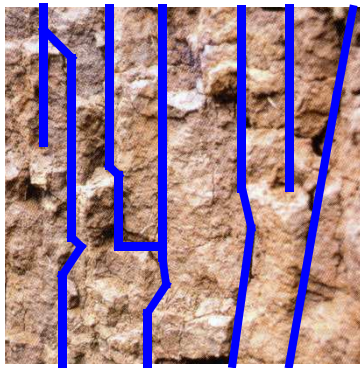
Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

4. Structure et fonctionnement des sols :

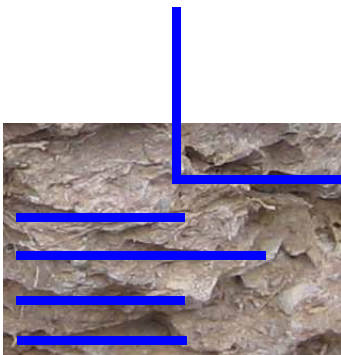
Polyédrique



Prismatique



Lamellaire



	Terre argileuse (Terrefort)	Terre limoneuse (Boulbène)	Terre sableuse
Racines primaires			
Longueur moyenne (mm)	42	127	129
Diamètre moyen (mm)	0,48	0,48	0,34
Surface développée (mm ²)	510	1 500	1 380
Racines secondaires			
Longueur moyenne (mm)	10,2	12,8	17
Diamètre moyen (mm)	0,30	0,22	0,2
Surface développée (mm ²)	904	5 000	10 800
Racines tertiaires			
Longueur moyenne (mm)	1,7	1,9	1,5
Diamètre moyen (mm)	0,24	0,17	0,12
Surface développée (mm ²)	913	1 100	176
Surface totale	2 329	7 600	12 356

Variations de la surface développée par les systèmes racinaires de jeunes plans de blé selon la structure. In Girard et al., 2011.

⇒ Impact sur l'enracinement et la circulation de l'eau et de l'air en profondeur (transports)

-
-
-

Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

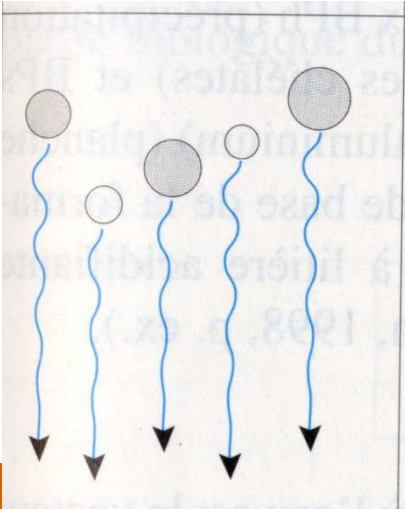
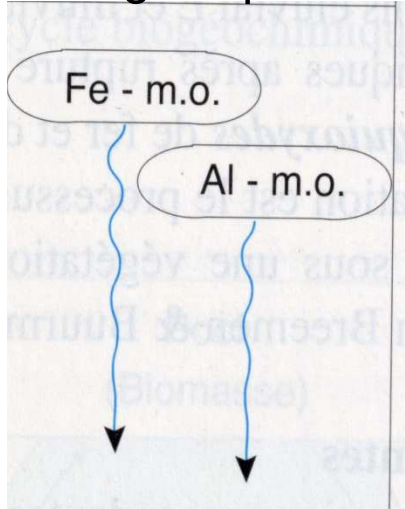
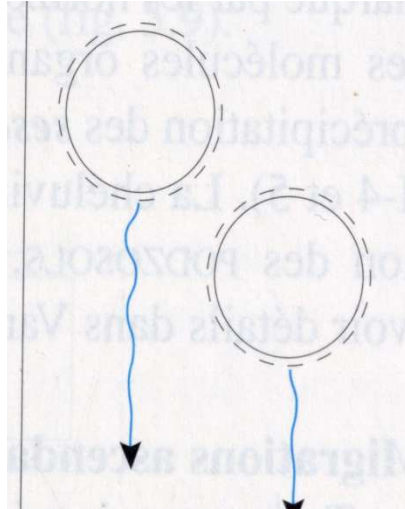
Les transferts de matière :

- Les agents des transferts
 1. Eau
 2. Les êtres vivants (végétaux, faune et l'homme)
 3. Le vent, le gel
- Les types de transfert liés à l'eau
 - Migrations descendantes si et seulement si $P > ETP$ (au moins saisonnièrement)
 - Migrations ascendantes en particulier si $P < ETP$ (au moins saisonnièrement)
 - Migrations latérales en fonctions des conditions locales (pente et perméabilité)

-
-
-

Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

Les migrations descendantes liées à l'eau :

	Lixiviation	Cheluviation	Eluviation Illuviation
Type	dissous	dissous	particulaire
Forme	ionique	Complexe avec matières organiques	
			

-
-
-

Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

Les migrations ascendantes liées à l'eau :

1. Ascensions capillaires :

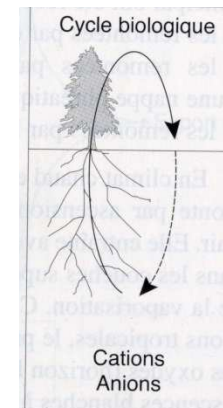
- sels solubles (chlorures, sulfates, carbonates)
- Fe et Mn au sein d'une nappe

2. Cycles biogéochimiques

Ascension des éléments nutritifs et autres avec l'eau (transpiration) et retour à la surface du sol par la chute de litière.



Croûtes salines à la surface d'un SALISOL, Thaïlande, In Girard et al., 2011



-
-
-

Phase 3 : Structuration et transport, la différenciation des horizons

La bioturbation :

Et les champions sont :

- vers de terre (zone tempérée)
- fourmis et termites (zone tropicale)

Pays, région	Formation végétale	Turricules (t/ha·an)
Suisse	Pré cultivé	18 à 81
Allemagne	Pré cultivé	91
Angleterre	Ancienne prairie	19 à 40
Allemagne	Hêtraie	7
Ghana	?	50
Côte d'Ivoire	Savane	507
Cameroun	?	2 100
Vallée du Nil	Zone cultivée	2 500

Masses de turricules dans différents milieux. Gobat et al., 2003

Mais il ne faudrait pas oublier :

- Les animaux fouisseurs (insectes, mammifères, oiseaux,...)
- l'Homme par le labour et les remaniements

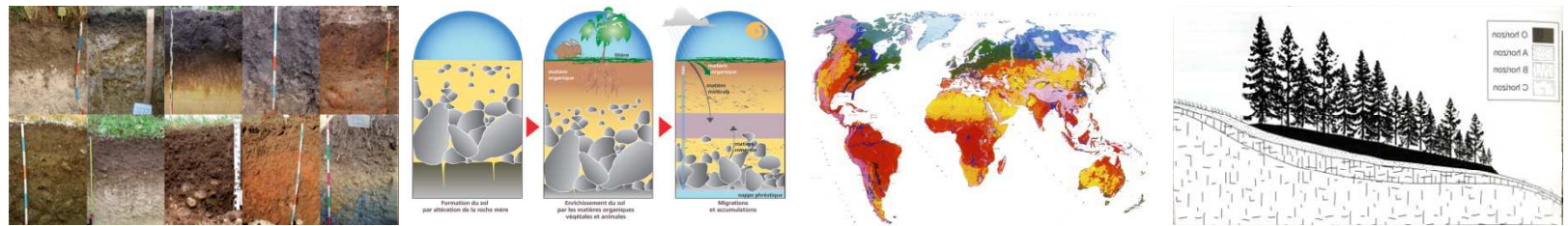
⇒ **Des flux susceptibles de contrebalancer les migrations descendantes**



Traces de campagnol, Ceillac, Queyras. Girard et al., 2011

-
-
-

3. Les Facteurs de la formation des sols



-
-
-
-
-
-
-
-
-

•
•
•

Les 5 facteurs de pédogenèse : le modèle

- Les précurseurs : Hilgard (1833-1916); Dokoutchaev (1846-1903)
 - La pédo-diversité est **organisée** dans l'espace
 - Identifient les principaux déterminants appelés : **facteurs de la pédogenèse**
- La première formulation mathématique : Jenny (1941)

Modèle clorpt

$$\text{Sol} = f(\text{Cl, o, r, p, t, ...})$$

Cl = **C**limat

O = **O**rganismes vivants

R = **R**elief

P = Matériel **P**arental

T = **T**emps

...= Facteur non identifié

• • • • • • • •

$$\vdots \text{ Sol} = f(\text{Cl}, o, r, p, t, \dots)$$

Les 5 facteurs de pédogenèse : le Climat

Le Climat est à la base des **flux d'énergie**

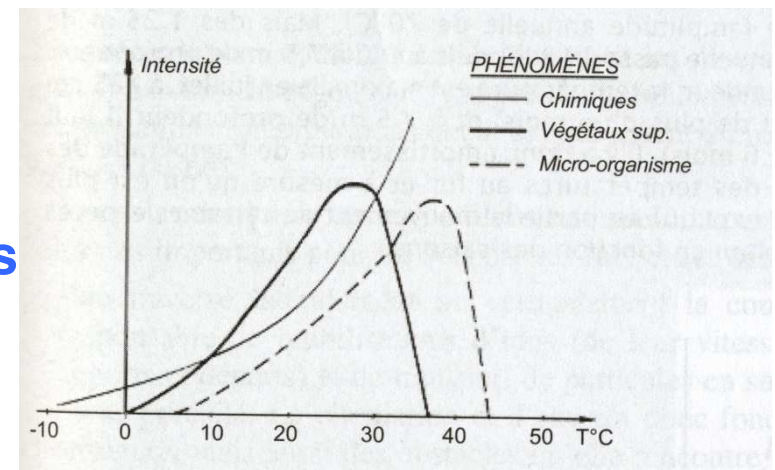
- Températures moyennes et leurs alternances journalières ou saisonnières

⇒ **La vitesse des réactions chimiques**

⇒ **L'activité des organismes vivants**

⇒ **Des processus aux conditions spécifiques**

(gélifraction)



Effet de la température sur divers phénomènes chimiques et organiques.

Girard et al., 2011

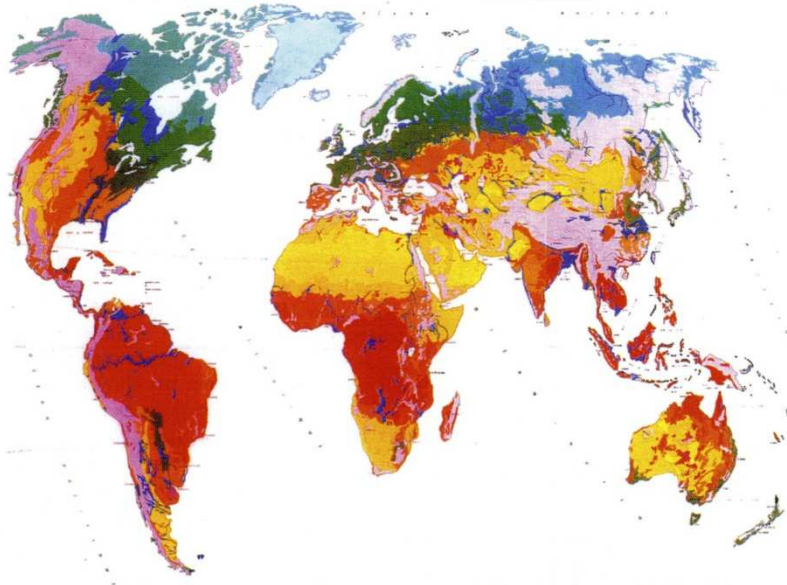
- Précipitations moyennes et la distribution temporelle des intensités

⇒ **La vitesse, la quantité et les modes de transport**

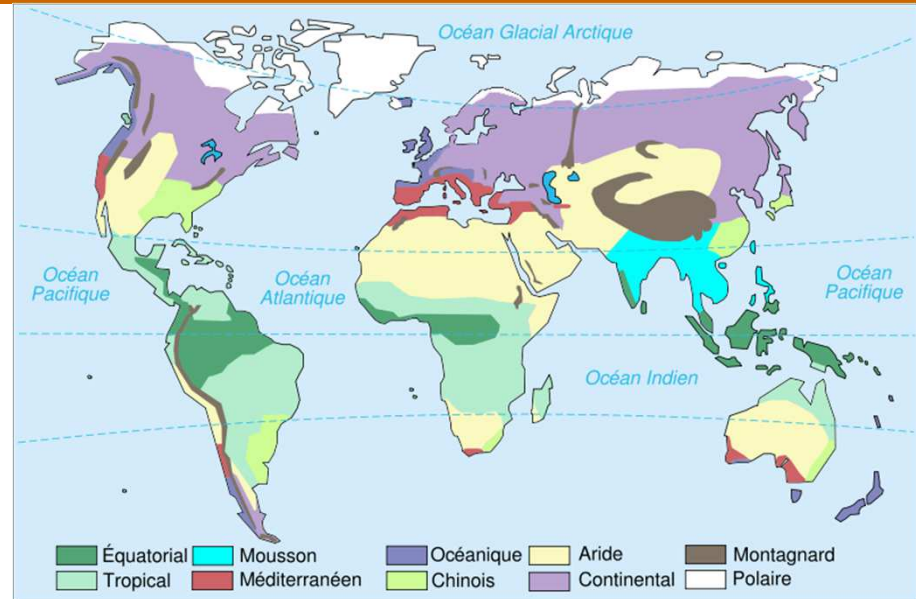
⇒ **L'activité des organismes vivants**

$$\text{Sol} = f(\text{Cl}, o, r, p, t, \dots)$$

Les 5 facteurs de pédogenèse : le Climat



Carte des grands types de sols mondiaux (AFES, 1984) in Mathieu, 2009.



Carte des grands types de climats mondiaux

- Des concordances entre grands types de climats et grands types de sol

$$\therefore \text{Sol} = f(\text{Cl}, o, r, p, t, \dots)$$

Les 5 facteurs de pédogenèse : le Climat

Un exemple : **l'épaisseur des sols**

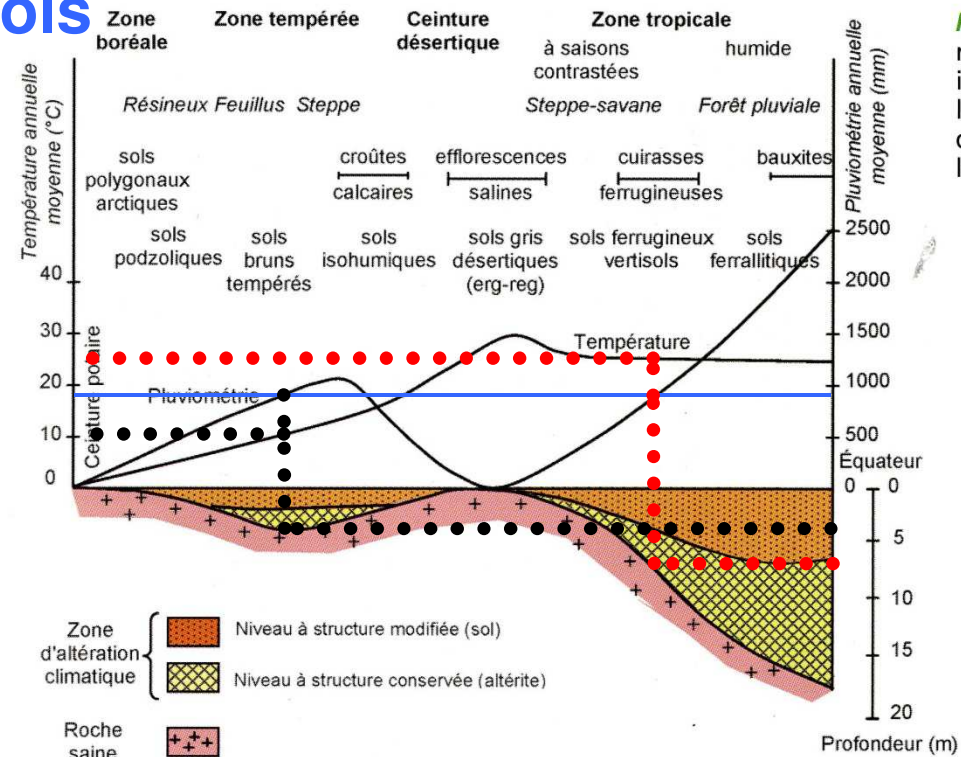
1. Deux zones sans sol

- zone boréale
- zone désertique

2. Une profondeur de sol corrélée à la pluviométrie

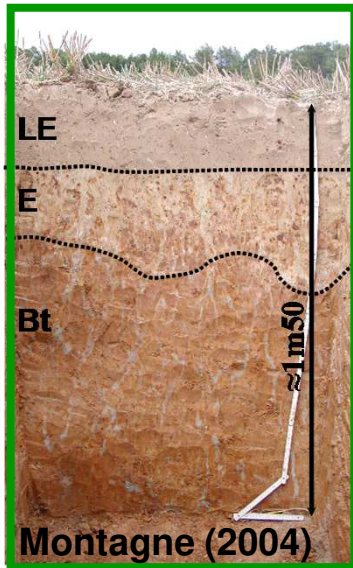
3. Pour des pluviométries identiques :

Des sols d'autant plus profonds que la température est élevée



Séquence latitudinale d'origine bioclimatique indiquant les variations de la nature et de l'épaisseur des sols du pôle nord à l'équateur (Pédro, 1985 in Mathieu, 2009)

Une règle générale : **l'intensité de l'évolution des sols est une fonction croissante des précipitations et de la température**



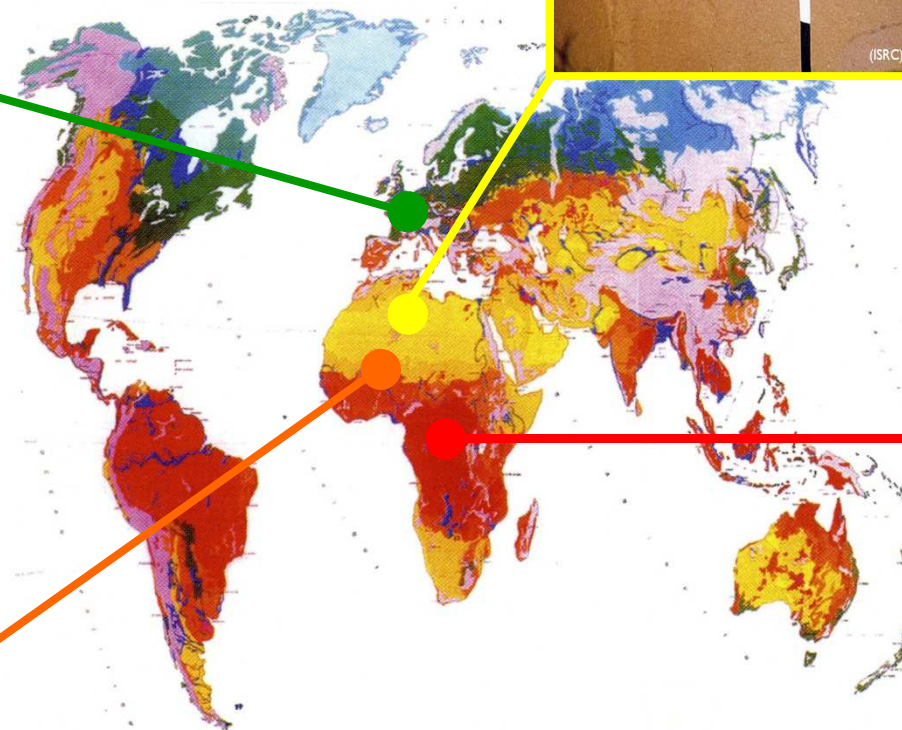
= f (Cl, o, r, p, t,...)

5 facteurs de pé

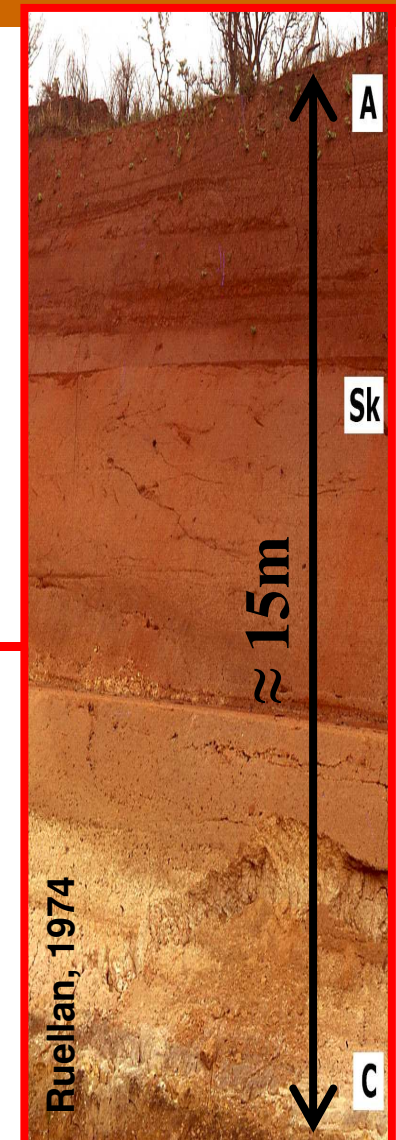
u monde en images.....



e : le Climat



Carte des grands types de sols mondiaux (AFES, 1984) in Mathieu, 2009.



- Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)

Les 5 facteurs de pédogenèse : le Climat

Zonation climatique des sols et séquences altitudinale

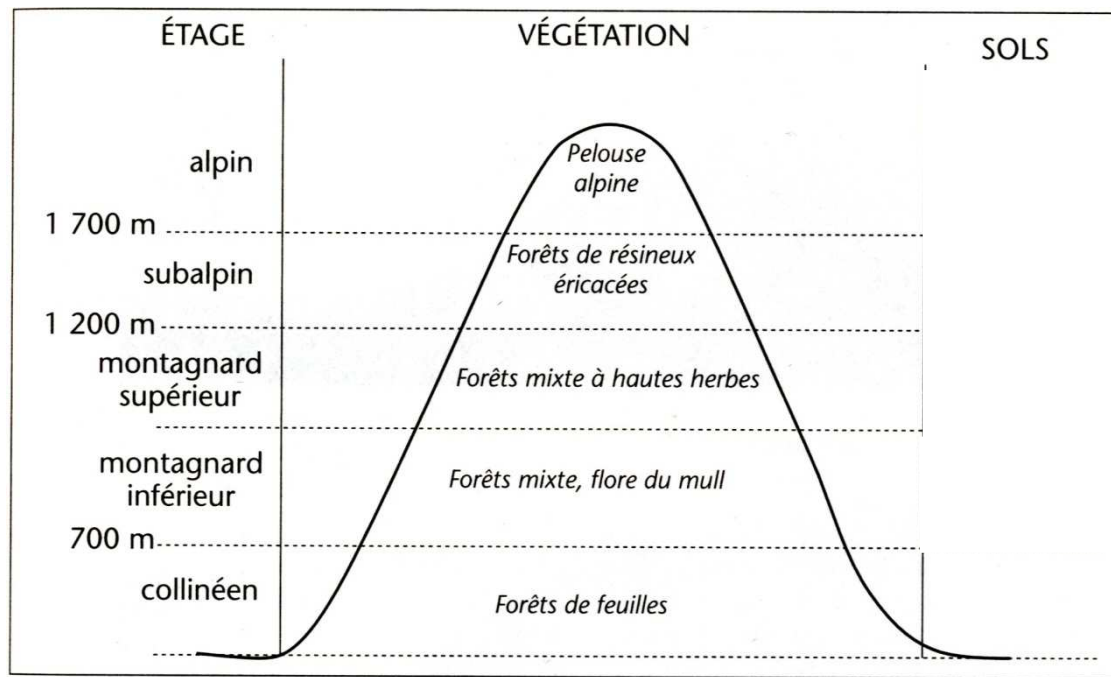


Figure 10-6 Zones de montagne, végétation et types de sol sur des roches granitiques

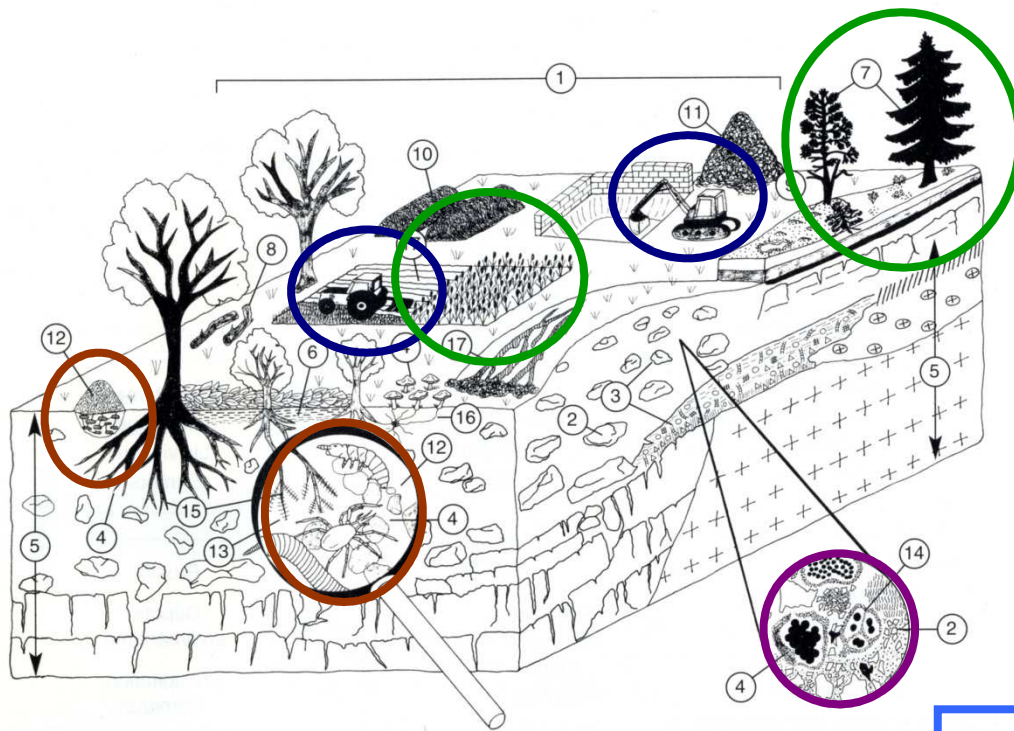
(Calvet, 2003)

⇒ L'accumulation des matières organiques augmentent avec l'altitude ou diminuent avec la température

•
• Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)
•

Les 5 facteurs de pédogenèse : les Organismes vivants

Mais qui se cachent derrière les « **Organismes vivants** » ?



- l'Homme

- Les végétaux supérieurs

- Les animaux (vers de terre, fourmis, termites, animaux fouisseurs,....)

- Les microorganismes

⇒ Au final : une très grande diversité d'acteurs

Fig. 1.2 Le sol, carrefour multifonctionnel. Les nombres signalent les chapitres correspondants.

•
• Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)
•

Les 5 facteurs de pédogenèse : les Organismes vivants

Les êtres vivants et leurs principaux rôles :

- **quantités** et **qualités** des apports de **matières organiques fraîches**
- s'opposent (végétaux) par les **cycles biogéochimiques** aux transferts par gravité
- Agents de **l'altération** (physique et chimique) des sols
- Agents de la **structuration** des sols et sont **créateurs** de porosité
- Participent aux transports de matières via la **bioturbation**

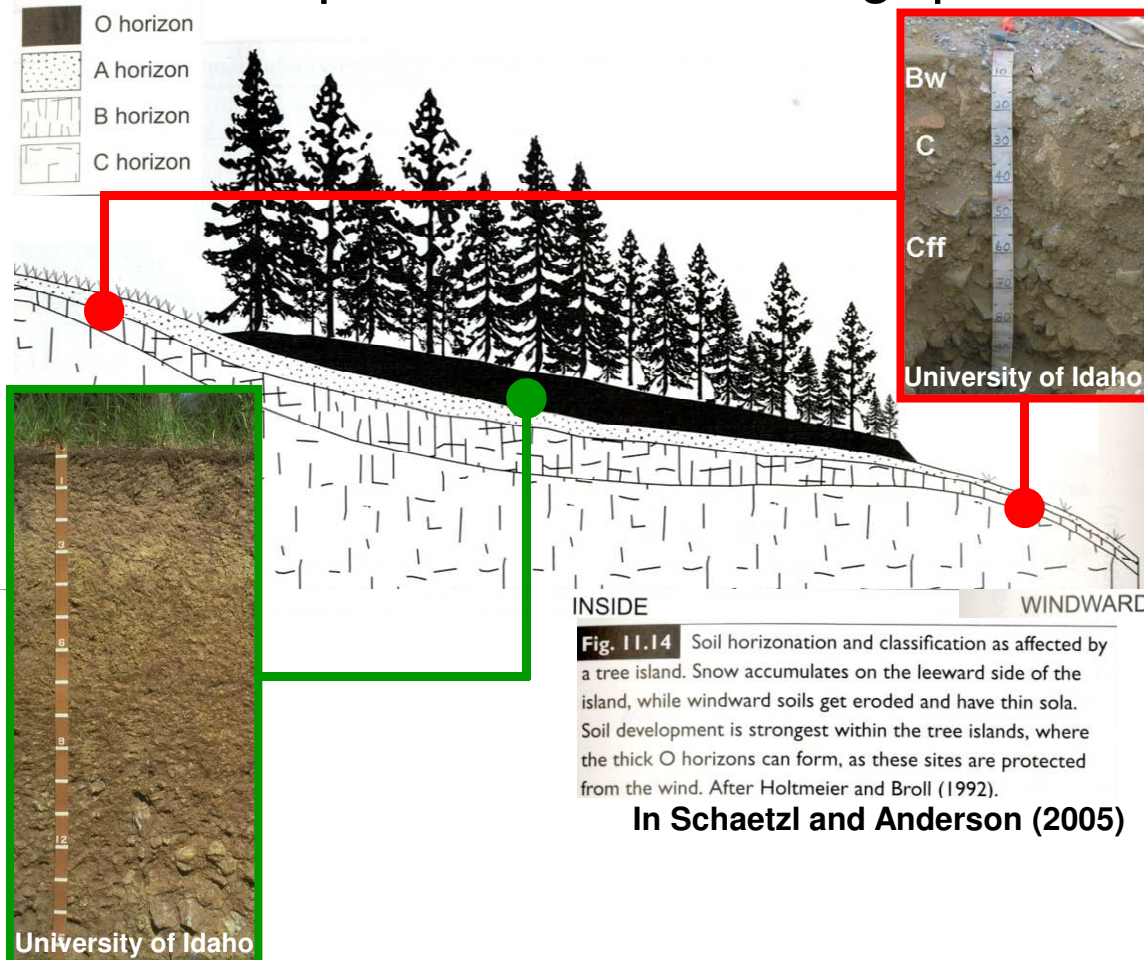


Détails d'un Luvisol montrant des galeries de vers de terre (zones sombres), Mons, France. D. Montagne, 2011.

$$\text{Sol} = f(\text{Cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t}, \dots)$$

Les 5 facteurs de pédogenèse : les Organismes vivants

Un exemple de facteur biologique : **les végétaux supérieurs**



1. **Altération** des roches et **approfondissement** des sols
2. **Protection du sol** contre l'érosion hydrique et éolienne
3. **Piégeage** et **accumulation** des sédiments.
4. Des phénomènes **auto-entretenus** dans le temps

-
- Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)
-

Les 5 facteurs de pédogenèse : les Organismes vivants

Un exemple de facteur biologique : les animaux

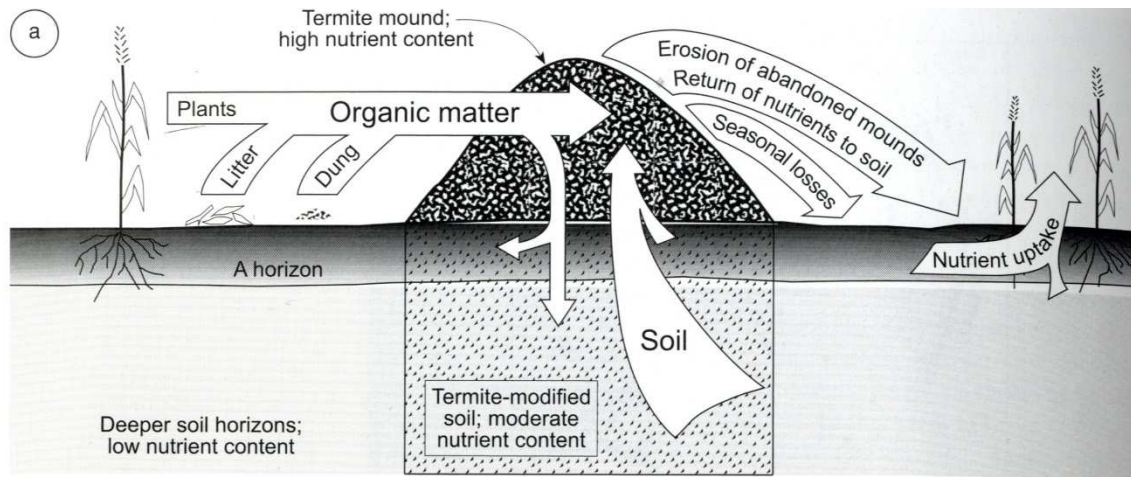
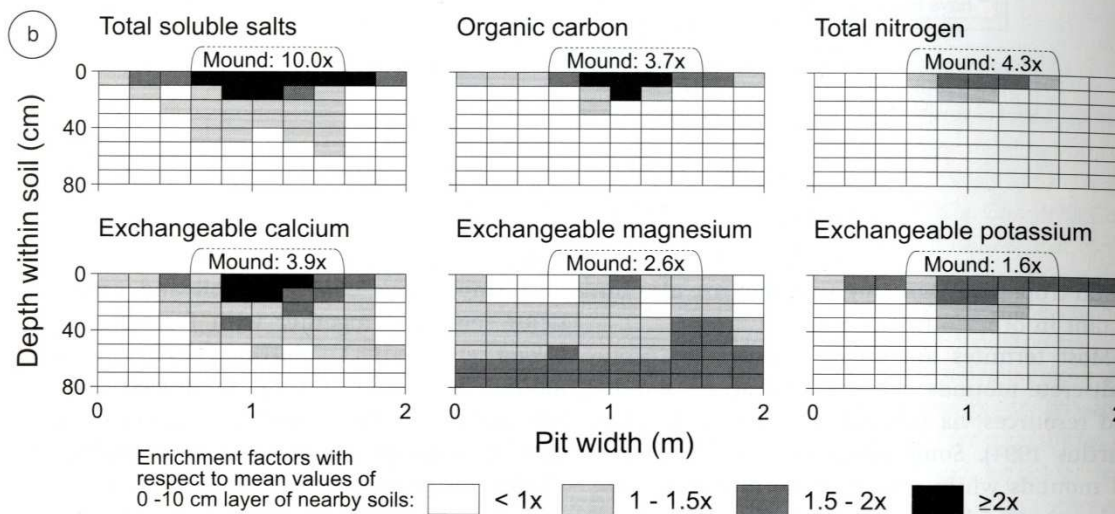


Fig. 10.8 Effects of termite mounds on soil fertility below and near the mound. After Coventry *et al.* (1988).

(a) Generalized flow patterns of nutrients through termite mounds. Similar flow paths could be fashioned for ant mounds. (b) Distribution patterns of various soil chemical components within and beneath termite (*Amitermes viosus*) mounds.

In Schaetzl and Andersen (2005)



Australie, Queensland (Montagne, 2007)

•
• Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)
•

Les 5 facteurs de pédogenèse : les Organismes vivants

Un exemple de facteur biologique : **les animaux**

Une organisation des sols classiques en zone tropicale caractérisée par :

- Des horizons de surface peu différenciés et pauvres en éléments grossiers
- Un lit d'éléments grossiers ou « stone line »

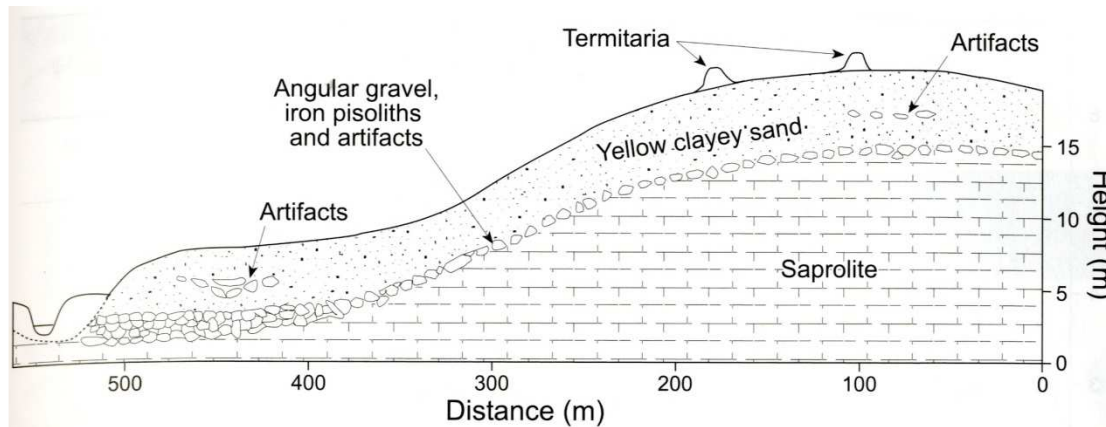


Fig. 10.11 Cross-section through a fluvial terrace in Zaire, In Schaetzl and Andersen (2005)

Un facteur : **la pédoturbation**

- Prélèvement en profondeur des matériaux fins déposés en surface
- Enfouissement des éléments grossiers

Ordre de grandeur (Gobat et al., 2003):

Fourmis jaunes des pâturages jurassiens = $1-3 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1} \approx 0,1-0,2 \text{ mm an}^{-1}$

Termites du Nord Cameroun = $1\,000 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1} \approx 5-10 \text{ cm an}^{-1}$

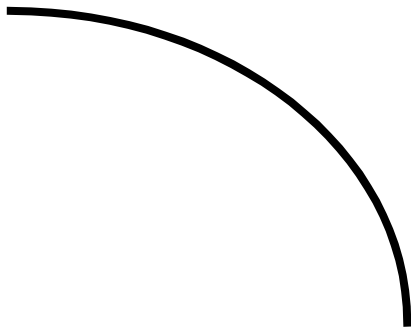
$$\therefore \text{Sol} = f(\text{Cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t}, \dots)$$

Les 5 facteurs de la pédogenèse : le Relief

Formes du **relief** et évolution des sols :

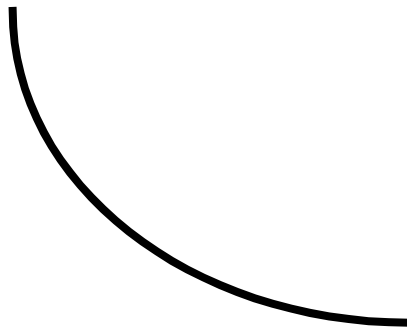
- Détermine le régime d'écoulement des eaux et donc le partage entre transports **latéraux** et transports **verticaux** (dissous et particulaire) ;
- Défini les **zones de départ** et les **zones d'accumulations** (eau, solutés et particules) à l'échelle des paysages

Formes convexes



**Favorables aux
pertes de matières**

Formes concaves



**Favorables aux
gains de matières**

• **Un frein puissant à la différenciation des profils de sol**

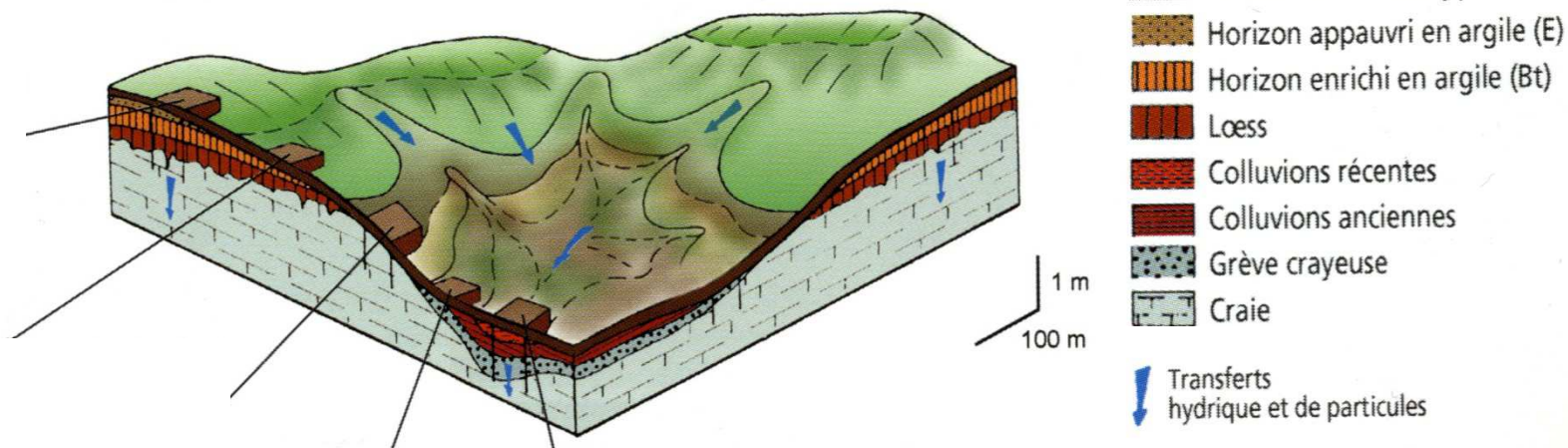
• **Un accélérateur puissant à la différenciation de la couverture pédologique**

∴ Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)

Les 5 facteurs de la pédogenèse : le Relief

Relief et **morphologie** des sols

Système sol dans un paysage limono-crayeux de Picardie



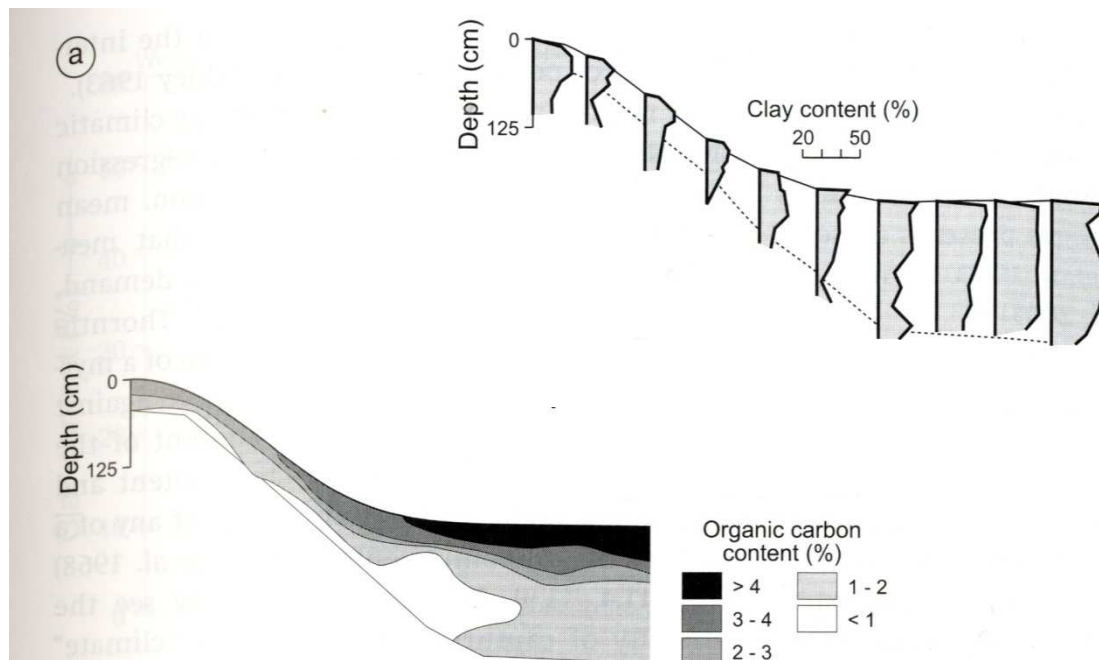
INRA (2009)

1. Position plane $\Rightarrow$ flux hydrique vertical $\Rightarrow$ **sols épais et différenciés**
2. Position de versant $\Rightarrow$ flux hydrique latéral $\Rightarrow$ **sols peu épais et appauvris**
3. Position de vallée $\Rightarrow$ accumulation des flux $\Rightarrow$ **sols épais d'accumulation souvent peu différenciés**

•
• Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)
•

Les 5 facteurs de la pédogenèse : le Relief

Relief et redistributions de matières



Schaetzl and Anderson (2005)

Des matières **transportées** :

- Les éléments **solubles**

- Les éléments **légers**

⇒ Les particules minérales de petites taille

⇒ Les matières organiques

A l'inverse, des éléments immobiles sauf phénomènes d'intensité exceptionnelle

- Les éléments **grossiers** : pierres, cailloux, graviers et sables

• • • • • • • •

•
• Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)
•

Les 5 facteurs de la pédogenèse : le matériel parental

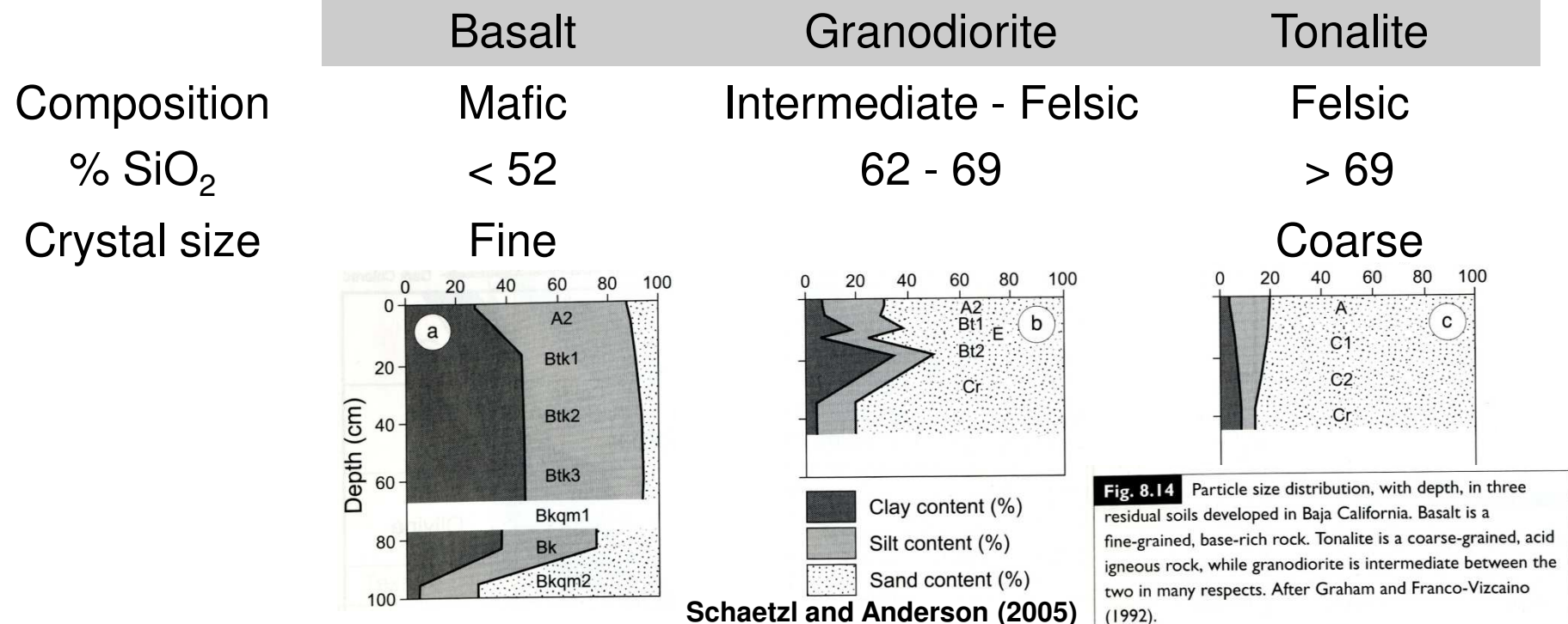
Le matériel parental : 5 manières d'influencer la formation des sols

1. Sa **consistance** : meuble, friable, massif, consolidé, dur,....
2. Sa **pénétrabilité par l'eau** fonction de sa fragilité, de sa structure, de sa porosité ou de sa fissuration, de sa granulométrie,....
3. Sa **minéralogie** et donc sa **sensibilité à l'altération**
4. Sa capacité à produire des **argiles** :
 - Basalte → 90 - 100%
 - Granite → 30 - 60%
 - Quartzite → 0 - 1 %
 - Schiste → 60 - 90%
 - Calcaire → 1 - 30 %
5. Sa capacité à libérer des **cations** :
 - Ca^{2+} : gypse, calcaire, feldspath,... - Mg^{2+} : olivine, dolomie,...
 - K^{+} : orthose, microcline, biotite,...

$$\therefore \text{Sol} = f(\text{Cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t}, \dots)$$

Les 5 facteurs de la pédogenèse : le matériel parental

Les roches ignées : influence de la **composition** et de la **texture**



⇒ Des sols d'autant plus épais et à texture fine que :

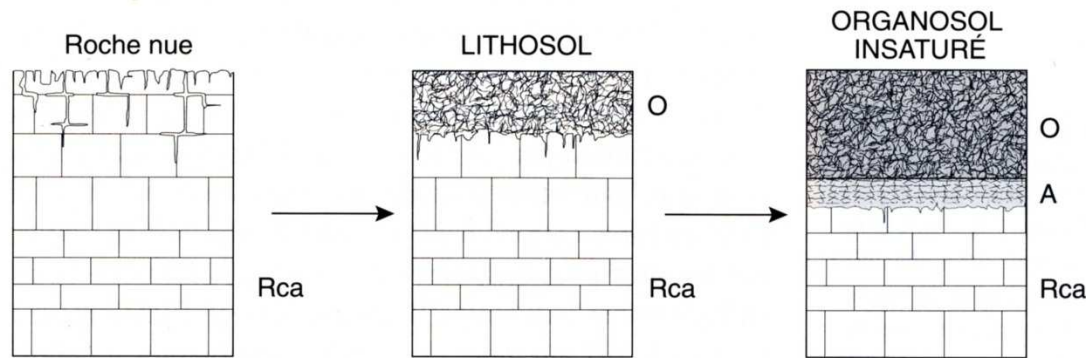
- le matériau parental est à texture fine
- est riche en minéraux altérables et pauvres en minéraux résistants

- Sol = f (Cl, o, r, **p**, t,...)

Les 5 facteurs de la pédogenèse : le matériel parental

Les roches calcaires : influence de la **dureté** (Gobat et al., 2003)

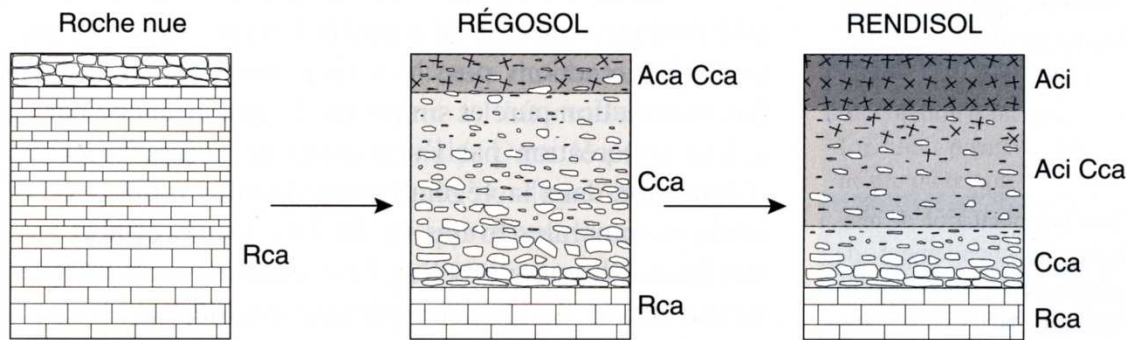
Calcaire dur



⇒ **Sol peu épais et acides**



Calcaire tendre



⇒ **Sol épais et calcaire**



$$\therefore \text{Sol} = f(\text{Cl}, \text{o}, \text{r}, \text{p}, \text{t}, \dots)$$

Les 5 facteurs de pédogenèse : Le temps

- Des **temps** inégaux et bornés :

zone géographique	Âge moyen	
zone polaire	0	⇒ Des sols « endormis »
zone tempérée	10 000	⇒ Des sols « rajeunis »
zone méditerranéenne	100 000	
zone intertropicale	1 000 000	⇒ Des sols « âgés »

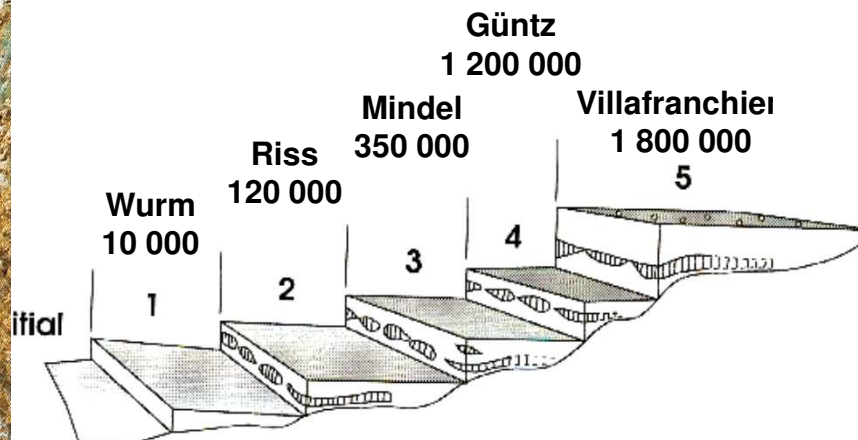
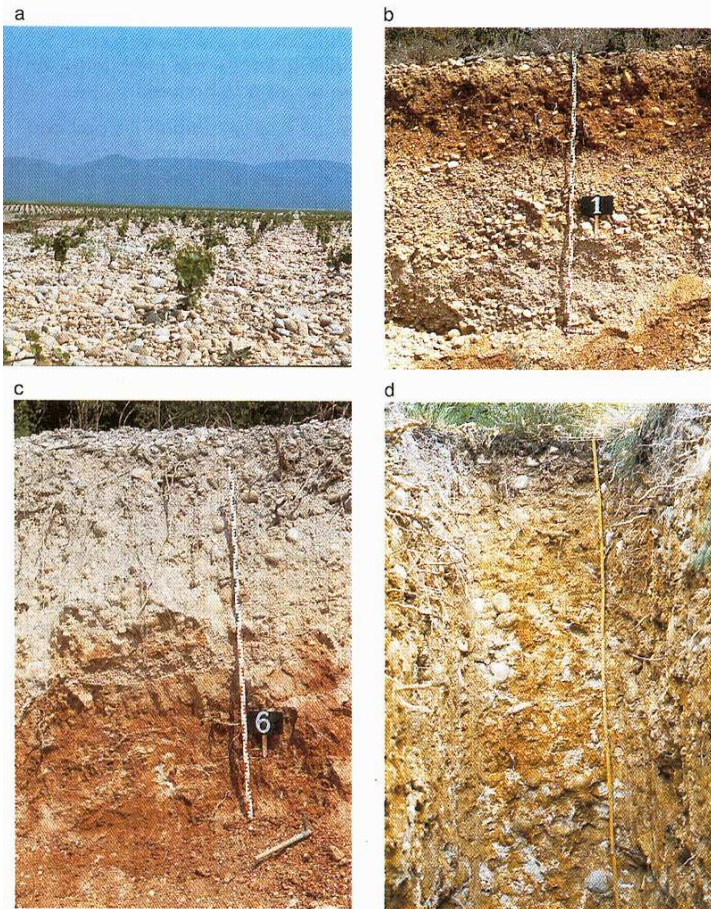
Adapté de Boulaine (1975) et Targulian and Krasilnikov (2007)

⇒ Le temps est la mesure qui permet de passer du concept du flux d'énergie à celle du flux cumulée d'énergie.

-
- Sol = f (Cl, o, r, p, t,...)
-

Les 5 facteurs de pédogenèse : Le temps

Temps et **morphologie** des sols : exemple de l'évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône (d'après Bornand 1978, in Ruellan et Dosso 1993)

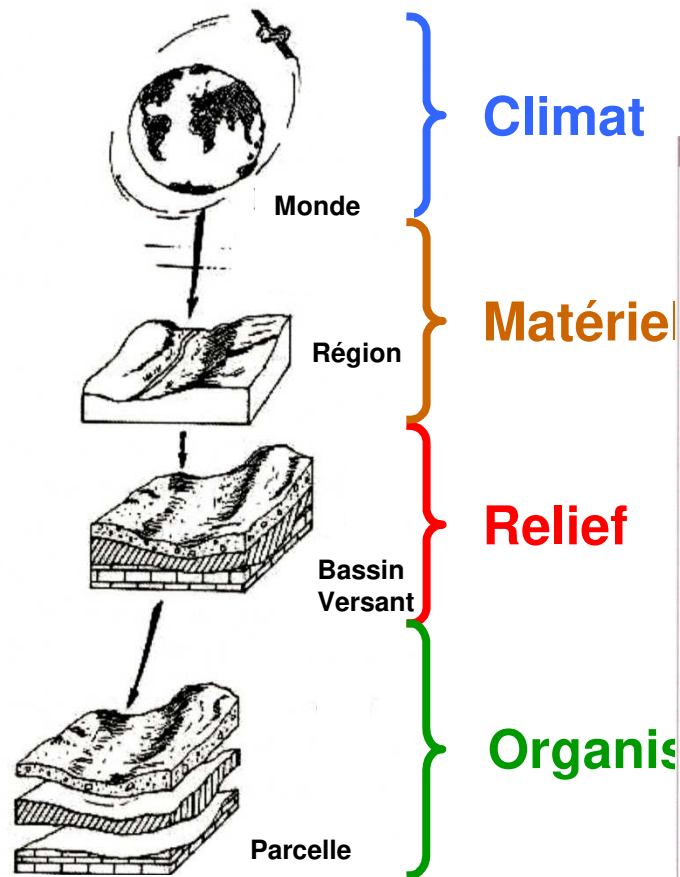


-
-
-

Les 5 facteurs de pédogenèse : bilan

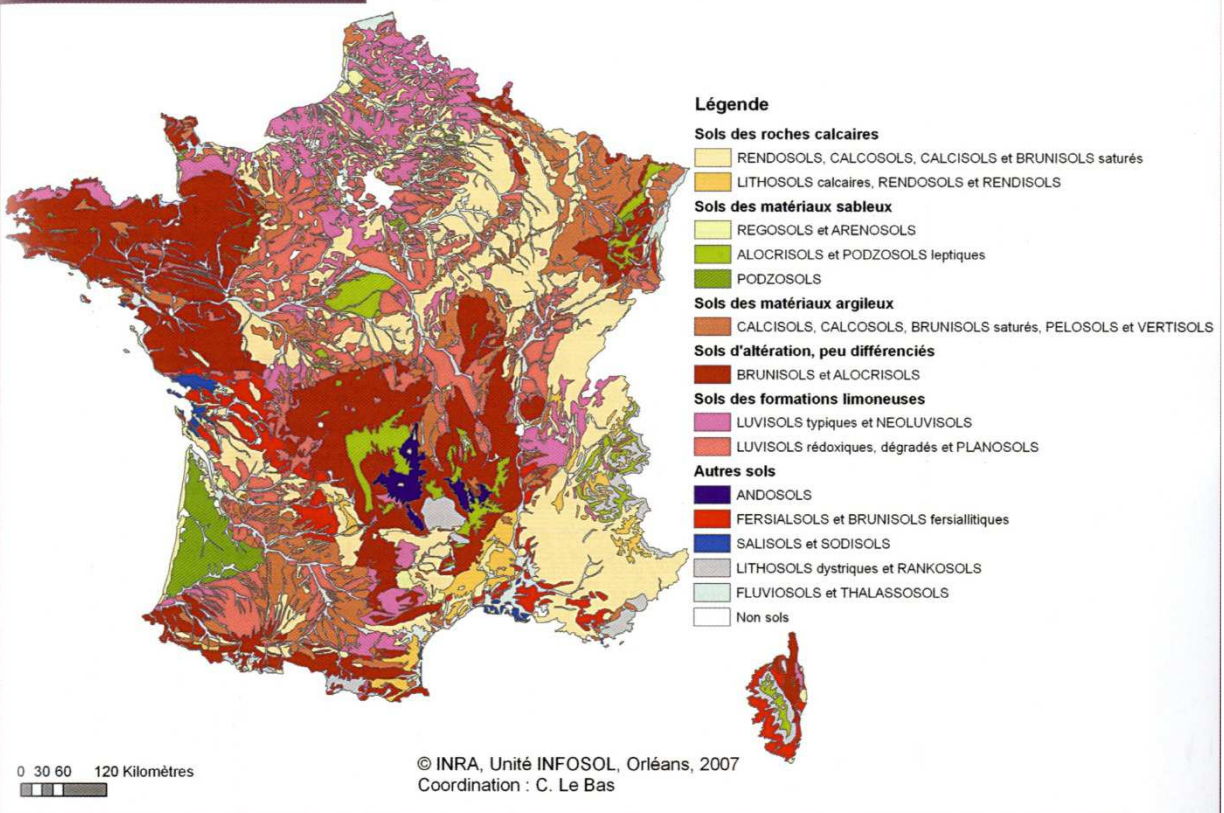
Des facteurs **dominants** fonction du **niveau d'organisation** considéré :

A l'échelle de la France et sous climat tempéré :



⇒ **Matériel parental et relief**

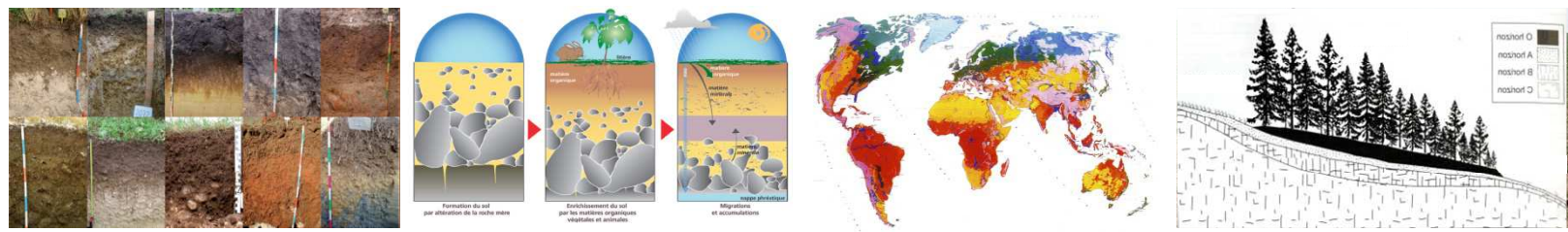
Carte des sols dominants de France



Les différents niveaux d'analyses de la couverture pédologique d'après Girard et al., (2005)

-
-
-

4. Conclusion



-
-
-
-
-
-
-
-

-
-
-

La formation des sols : L'essentiel

- La formation des sols **ne doit rien au hasard** mais répond à un **principe général déterministe** :

Milieu → Processus → Propriétés

- Elle se compose de **3 phases** : 1- altération, 2- incorporation des matières organiques et 3- structuration et transport
 ⇒ se **superposent** plus qu'elles ne se **succèdent** dans le temps
 ⇒ ont pour résultat **l'approfondissement** et **la différenciation** (tris) de la couverture pédologique.
- Elle est sous la dépendance de **5 facteurs hiérarchisés** : 1- le climat; 2- le matériel parental, 3- le relief, 4- les organismes vivants (dont l'homme), 5- le temps
- 1 principe, 3 phases et 5 facteurs pour **une infinité de sols inégalement distribuée à l'échelle de la planète**



Merci pour votre attention
Place à la discussion

-
-
-

Bibliographie

- Brady, N.C., Weil, R.R., 2002. The Nature and Properties of Soils. Thirteenth Edition. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, United States of America, 960 pp.
- Calvet, R., 2003. Le Sol, propriétés et fonctions. Tomes 1: Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Editions France Agricole, 456pp.
- Girard M-C., Walter C., Rémy J-C., Berthelin J., Morel J-M., 2005. Sols et Environnement. Dunod, Paris, 816 pp.
- Girard M-C., Schwartz C., Jabiol B. 2011. Etude des Sols: description, cartographie, utilisation. Dunod, Paris, 404 pp
- Gis Sol. 2011. L'état des Sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188p.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2003. Le Sol vivant. Bases de pédologie biologie des sols, Deuxième édition. Presses Polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 568 pp.
- INRA, 2009. Dossier INRA : Le Sol. INRA mensuel, janvier 2009, 183 pp.
- Jabiol B., Brêthes A., Ponge J.-F., Toutain F., Brun J.-J., 1995. L'humus sous toutes ses formes. Engref, Nancy, 63pp.
- Mathieu C., 2009. Les principaux sols du monde, Voyage à travers l'épiderme vivant de la planète Terre, Editions TEC&DOC, Lavoisier, Paris, 233 pp.
- Ruellan A. et Dosso M., 1993. Regards sur le sol. Collection « Universités francophones », Editions Foucher-AUPELF, Paris, 192pp.
- Schaetzl R. and Anderson S., 2005. Soils Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press, New York, USA, 817 pp.