

Initiation et sensibilisation à la connaissance des sols

Constituants minéraux du sol

RAPPEL: enquête sur les nouvelles qualifications FFESSM_mémoire Instructeur régional RABA_JM Vinatier

Jean Marie VINATIER (CRARA)

Ont également participé à la réalisation de ce montage



Association pour la Relance Agronomique en Alsace

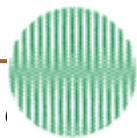


Ministère
de l'Agriculture et de la Pêche

Centre National d'Etudes et de Ressources
en Technologie Avancée



nation



INRA

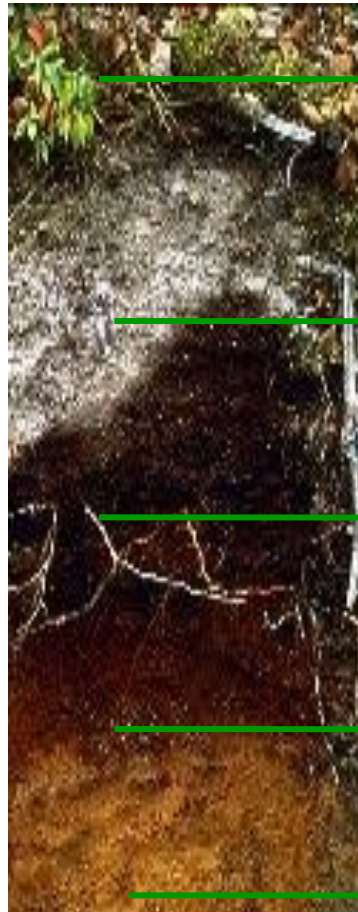
naissance des sols



Organisation de la formation

- Module 1/ Les sols : observation et fonctionnement
- **Module 2/ constituants minéraux du sol**
- Module 3/ Matière organique des sols
- Module 4/ Initiation à la pédogénèse
- Module 5/ Cartographie des sols et des paysages, gestion des informations
- Module 6/ : Évaluation du potentiel épurateur des sols

Constituants minéraux du sol



**Les différentes phases du sol
(rappels)**

Les différents minéraux

Les minéraux argileux

Les sels et sesquioxides

Bilan

Les différentes phases du sol (rappel)

Phase solide

constituants
minéraux

40% vol. & 95% pds



constituants
organiques

10% vol. & 5% pds

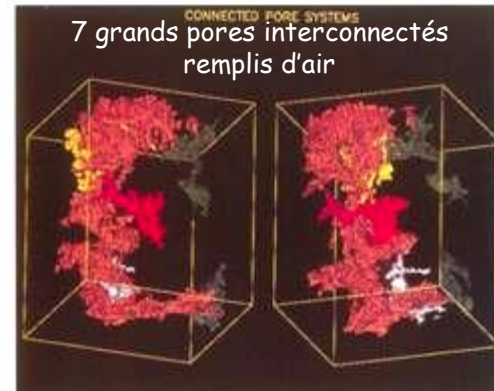
matière
organique morte
organismes
vivants



Source : Granval (ONC)

Phase liquide (solution du sol)

Phase gazeuse (atmosphère du sol)



Source : Heijs *et al.*, 1995



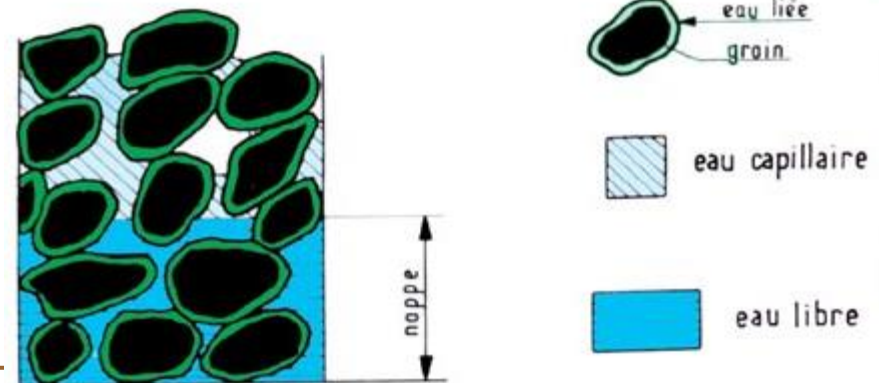
Sol tourbeux



Source :

Phase liquide : la solution du sol

- Grande variabilité spatiale et temporelle
- Toujours chargée en substances dissoutes :
 - Organique & minérales,
 - Ionisées, non ionisées.
- Particules en suspension :
 - colloïdes et chélates
 - bactéries, virus.



Phase gazeuse : l'atmosphère du sol

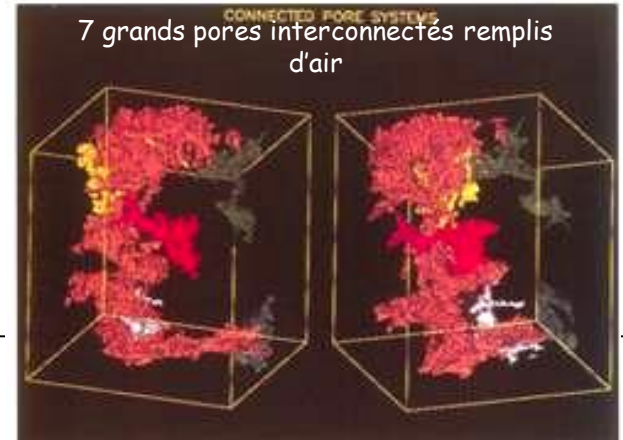
Air \pm chargé d'eau en fonction de la température,

Proportions variables de gaz,

Respiration \rightarrow O₂, CO₂

Réduction \rightarrow CH₄, N₂, NH₃

Oxydation \rightarrow NO₂, NO



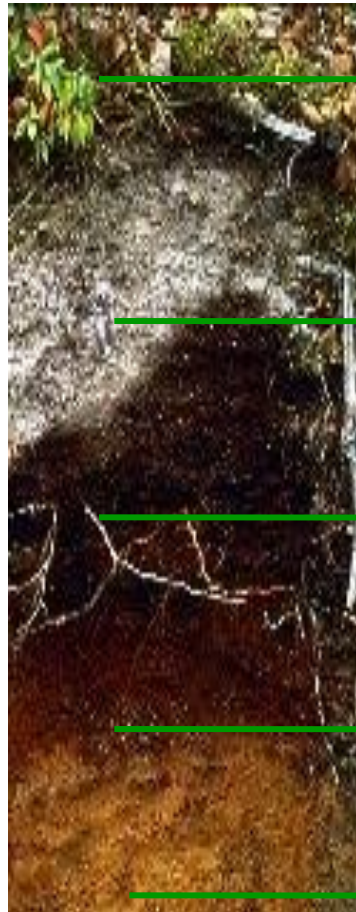
Actions des micro-organismes

Distribution du CO₂ en fonction de la profondeur et la texture:

Sol sableux: 25 cm \rightarrow 1-2 %, 50 cm \rightarrow 1-3,5 %, 100 cm \rightarrow 2-5 %

Sol argileux: 25 cm \rightarrow 2-5 %, 50 cm \rightarrow 2,5-6,0 %, 100 cm \rightarrow 2-12 %

Constituants minéraux du sol



Les différentes phases du sol
(rappels)

Les différents minéraux

Les minéraux argileux

Les sels et sesquioxydes

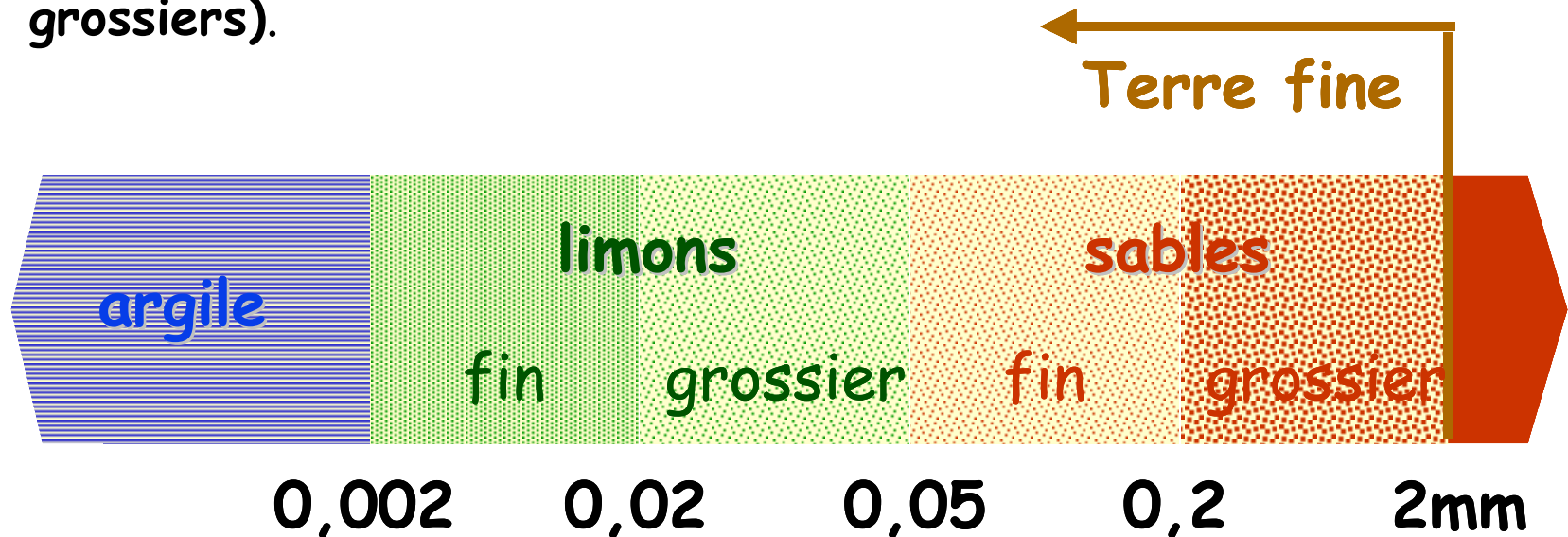
Bilan

Phase solide du sol ?

Granulométrie (rappel)

Classement selon leur

- **granulométrie** : terre fine et fraction grossière (au-delà de 2mm, les constituants minéraux sont des **éléments grossiers**).



- **minéralogie** : quartz, minéraux silicatés, sels et sesquioxides

MINERAUX PRIMAIRES SILICATES

MINERAUX RESISTANTS (Quartz)



altération

MINERAUX
RESIDUELS
non ou peu
altérés
(quartz...)

**Minéraux primaires
hérités**

MINERAUX ALTERABLES (Micas, feldspaths, amphiboles)



altération

*dégradation
agradation*

synthèse

MINERAUX
NEOFORMES
(sels, oxydes,
argiles...)

MINERAUX
TRANSFORMES
(argiles...)



Minéraux secondaires

COMPOSES
SOLUBLES

lixiviation

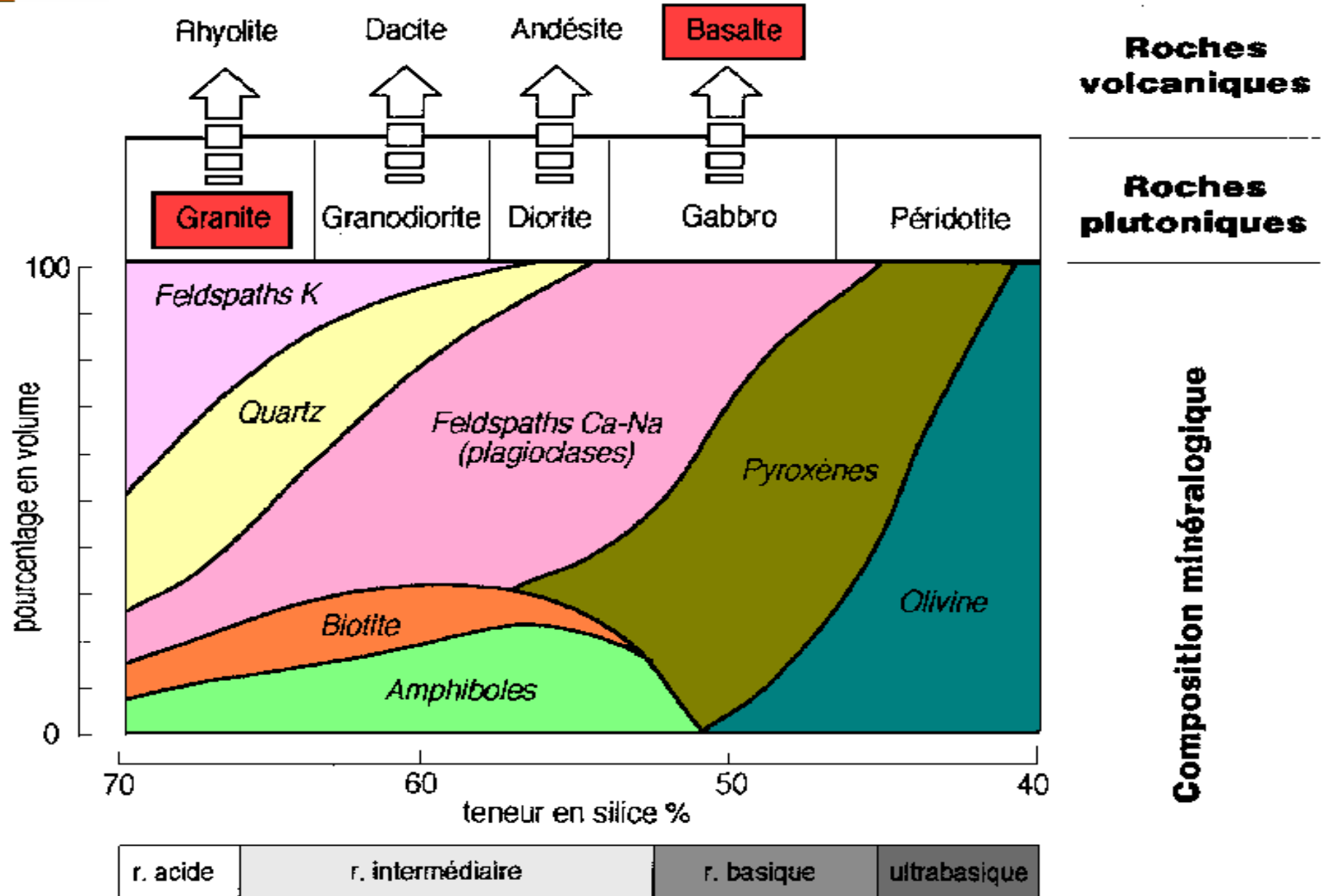
**EVACUATION
VERS
NAPPES
ET
RIVIERES**



Principaux minéraux des roches silicatées (pm)

GROUPE	minéral	Formule
AMPHIBOLES	Hornblende	$\text{Na Ca}_2 (\text{Mg, Fe})_4 (\text{Al, Fe}) (\text{Si, Al})_8 \text{O}_{22}(\text{OH, F})$
PYROXENES	Augite	$(\text{Ca, Mg, Fe, Al})_2 (\text{Al, Si})_2 \text{O}_6$
PERIDOTS	Olivine	$(\text{Mg, Fe})_2 \text{SiO}_4$
FELDSPATHS alcalins	Orthose	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$
	Albite	$\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$
FELDSPATHS plagioclases	Anorthite	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$
	Albite	$\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$
FELDSPATHOIDES	Leucite	$\text{K Al Si}_2 \text{O}_6$
	Néphéline	Na Al SiO_4
QUARTZ		SiO_2
MICAS	Muscovite	
	Biotite	$\text{K} (\text{Mg, Fe})_3 (\text{Al Si}_3) \text{O}_{10} (\text{OH, Fe})_2$
	Chlorite	$(\text{Mg, Fe})_{10} \text{Al}_2 (\text{Si, Al})_8 \text{O}_{20} (\text{OH, F})_{16}$

Composition des principales roches magmatiques et éruptives (silicatées)



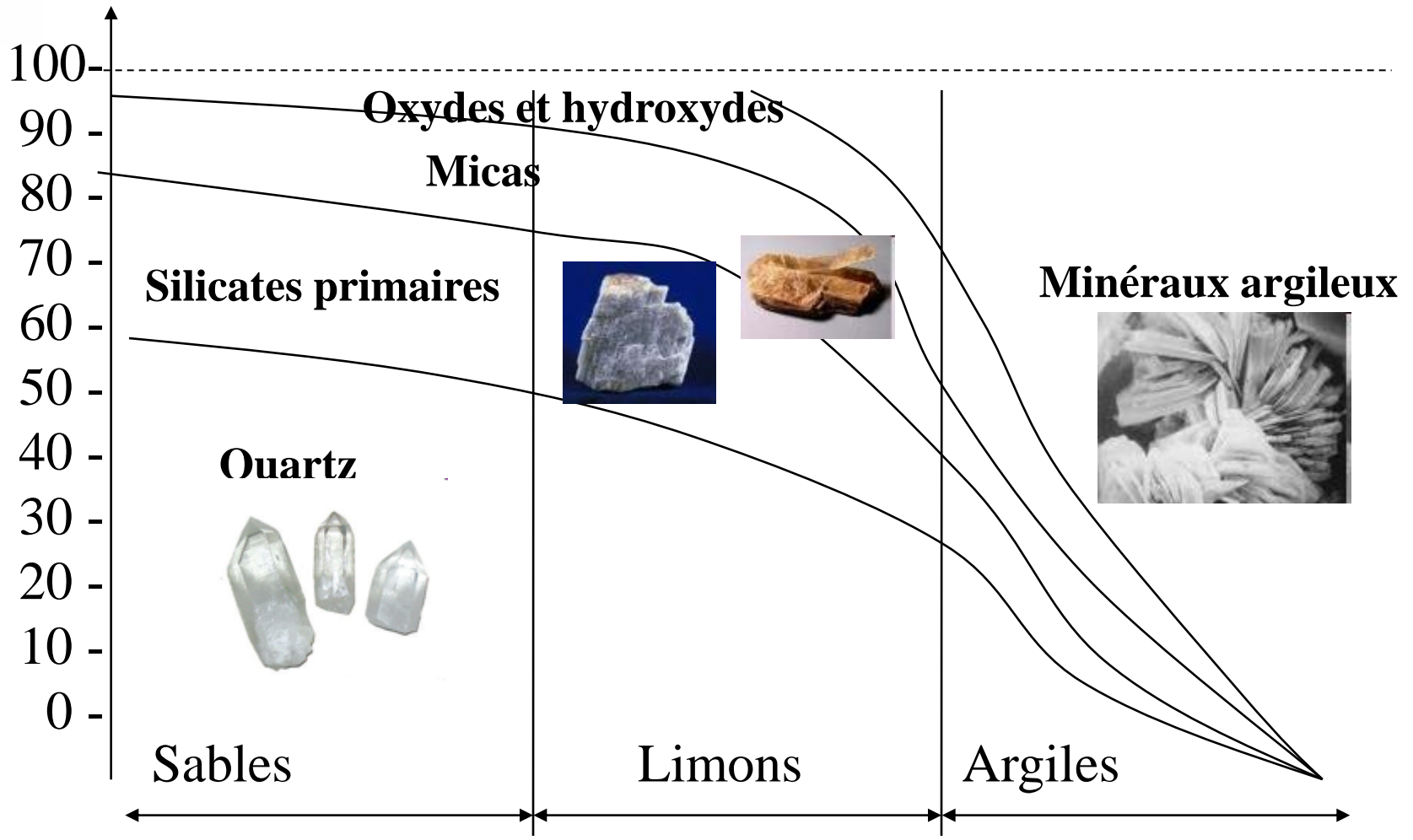


Principaux minéraux non silicatés

CARBONATES	Calcites et aragonites	Ca CO_3
	Dolomites	$(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{CO}_3$
SULFATES	Gypse	$\text{Ca SO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$
PHOSPHATES	Apatite	$\text{Ca}_5 (\text{F}, \text{Cl}) (\text{PO}_4)_3$
OXYDES	Hématites	Fe_2O_3
HALOGENURE	Chlorure de sodium	NaCl

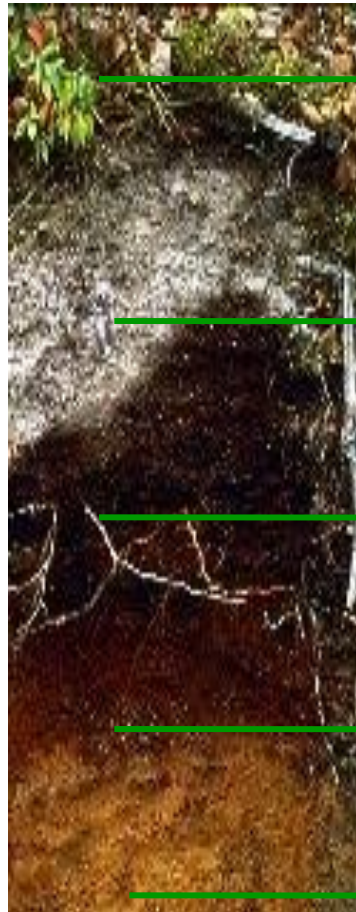
Texture des grands types de roches sédimentaires

Composition	Granulo.	Consistance		
		Meuble	Consolidée	Durcie
Roches silicatées	Fine	Argiles & marnes	Ardoises	Meulière s
	Limoneuse	Loess, lehm & limons	Grauwackes	
	Sableuse	Sables	Grès	
Roches calcaires	Argilo- limoneuses	Craies	Calc. Oolithiques	Calc. Coralien
		Calcaires fins	Tufs	Marbres
Roches mixtes	Fines	Calcaire marneux	Marbres argilo calcaire	
	Grossières	Calcaires gréseux & molasses	Meulières calcaires	



Exemples de composition minéralogiques des particules
selon les différentes fractions granulométriques

Constituants minéraux du sol



Les différentes phases du sol
(rappels)

Les différents minéraux

Les minéraux argileux

Les sels et sesquioxides

Bilan

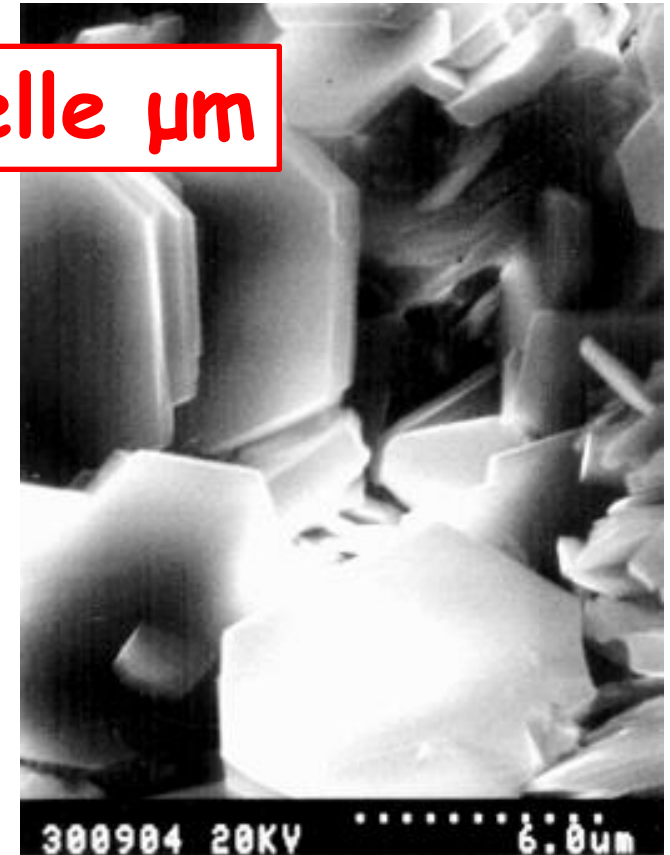
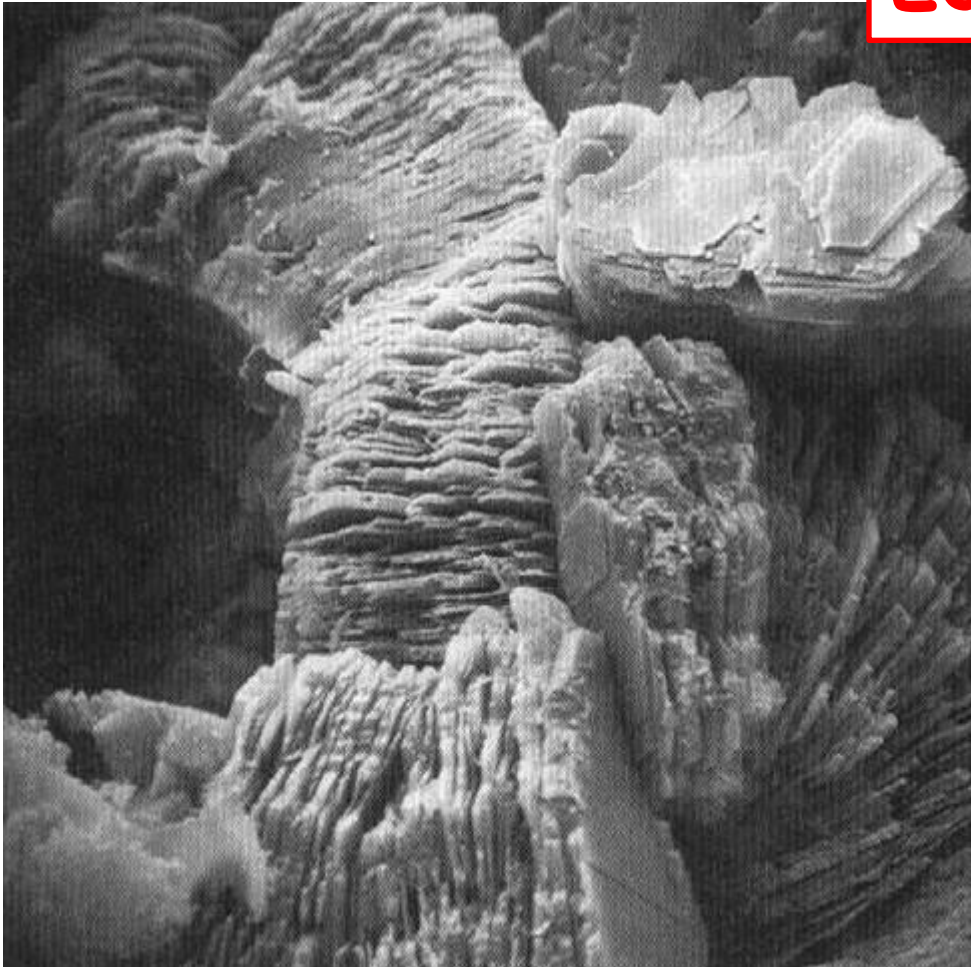
Les minéraux argileux

- Minéraux argileux = 30 à 60 % des argiles granulométriques
- Principales caractéristiques
 - Composition chimique : Phyllosilicates
 - Granulométrie : Dimension $< 2\mu\text{m}$
 - Forme lamellaire
 - Possibilité de suspension aqueuse +/- stable

De quoi sont constitués les sols ?

Constituants minéraux

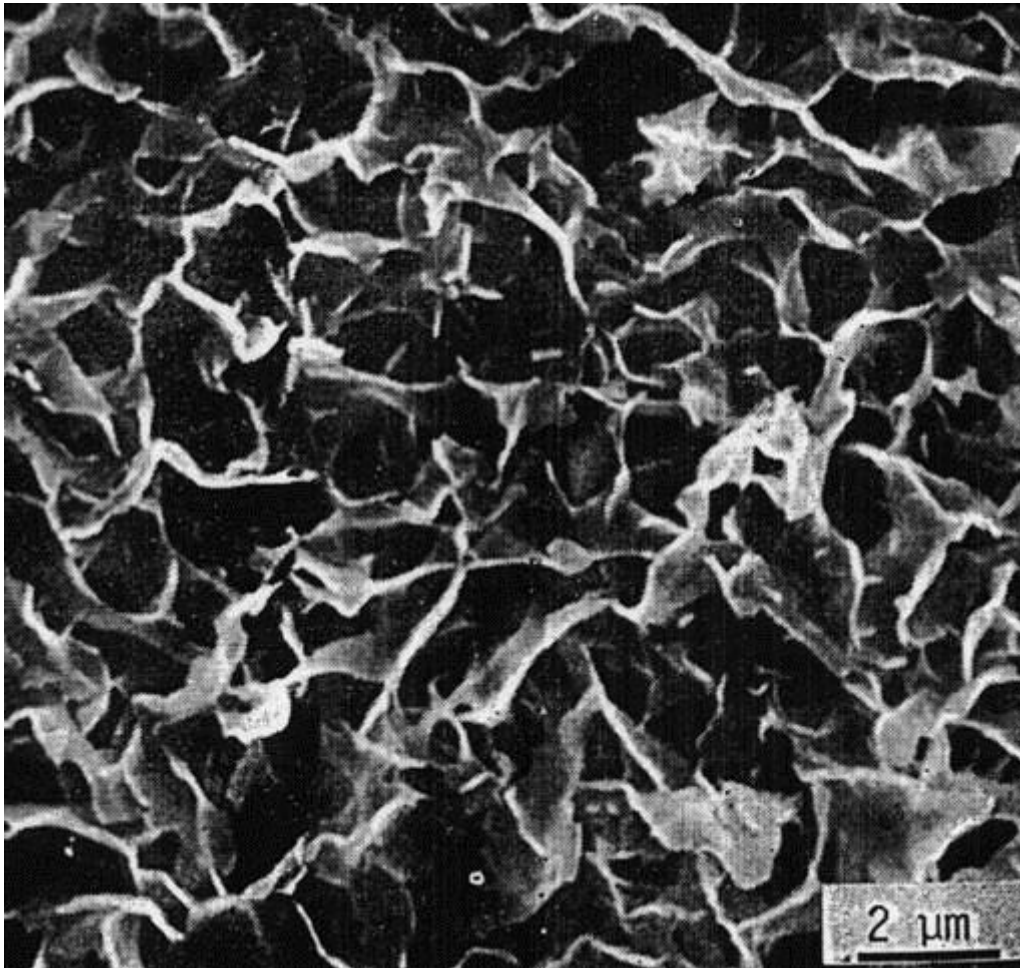
Echelle μm



Exemple d'argiles :
la **kaolinite**

De quoi sont constitués les sols ?

Constituants minéraux

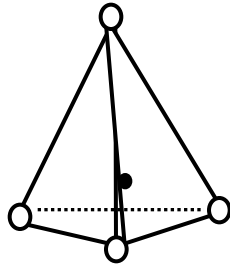


Source : D. Tessier

Echelle μm

Exemple d'argiles :
la **montmorillonite**

Tétraèdre Silicium - Oxygène

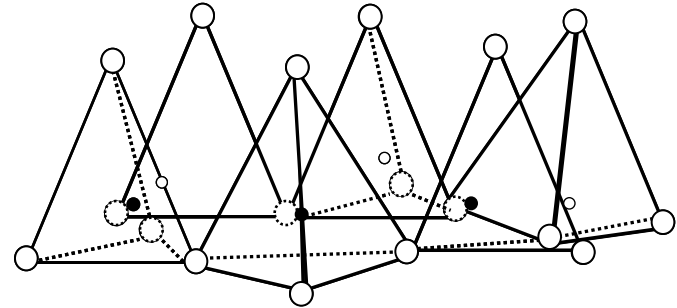


Echelle Å

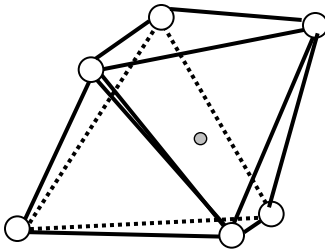
○ ○ Oxygène

• • Silicium

Couche tétraédrique



Octaèdre Aluminium – Oxygène / Hydroxyle



○ ○ Hydroxyle

• • Aluminium, Magnésium...

Couche octaédrique

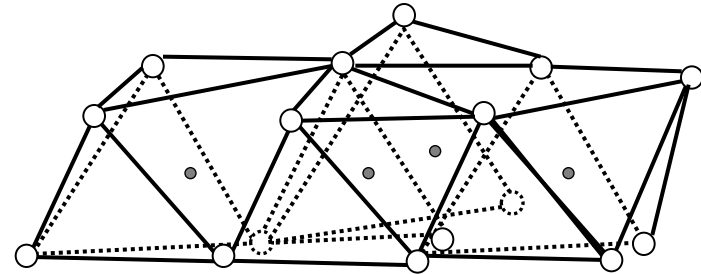
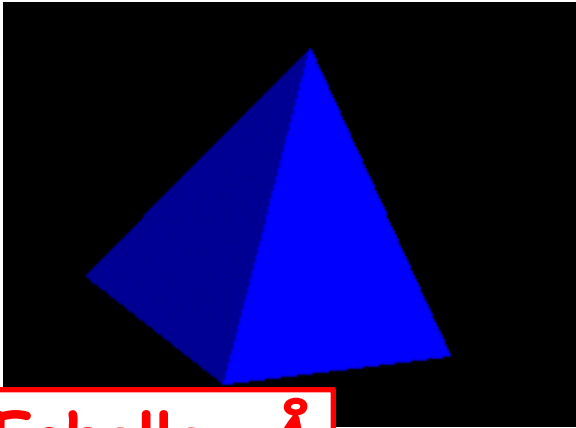
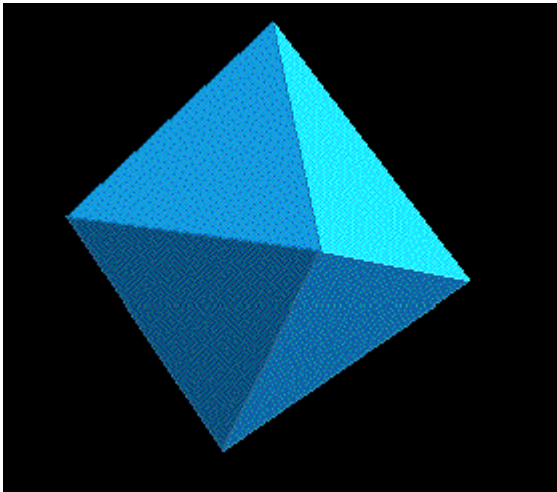


Schéma d'un tétraèdre



Echelle Å

Schéma d'un octaèdre

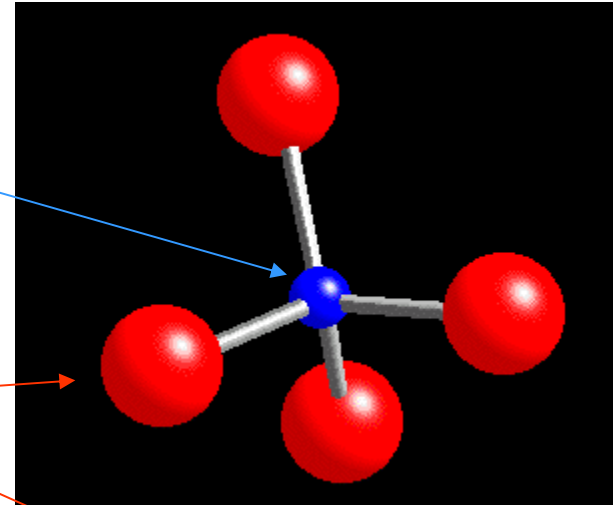


Tétraèdre

Si⁴⁺

O²⁻

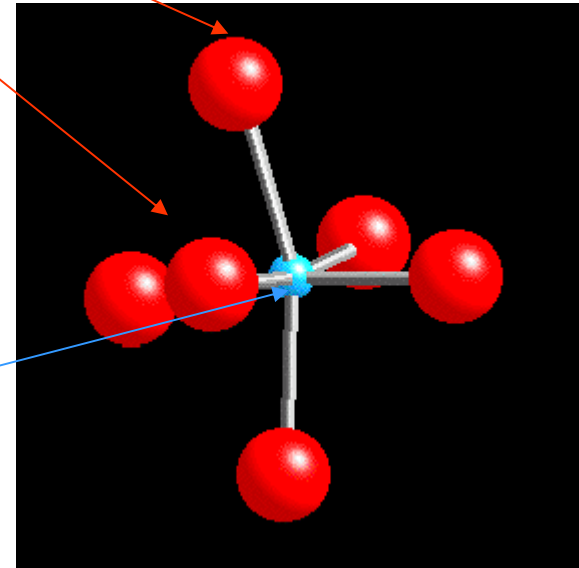
HO⁻



Octaèdre

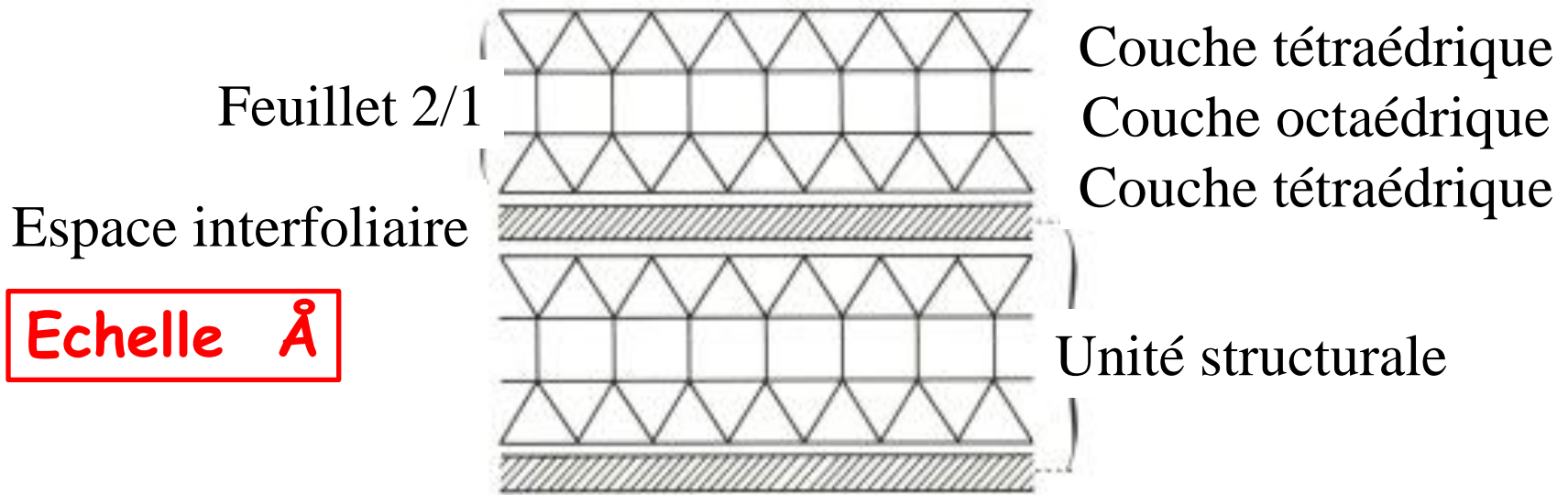
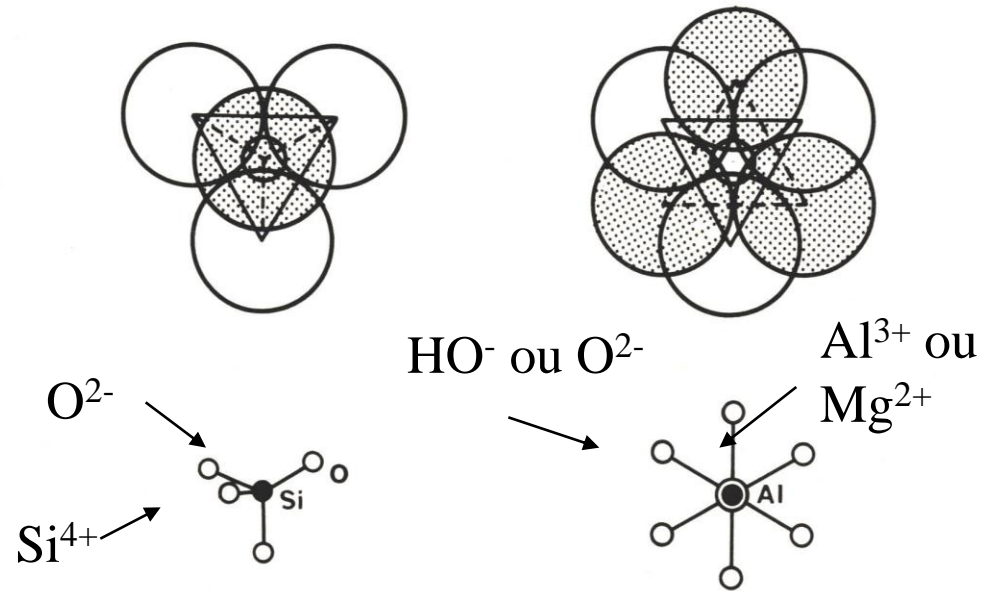
Al³⁺

Mg²⁺

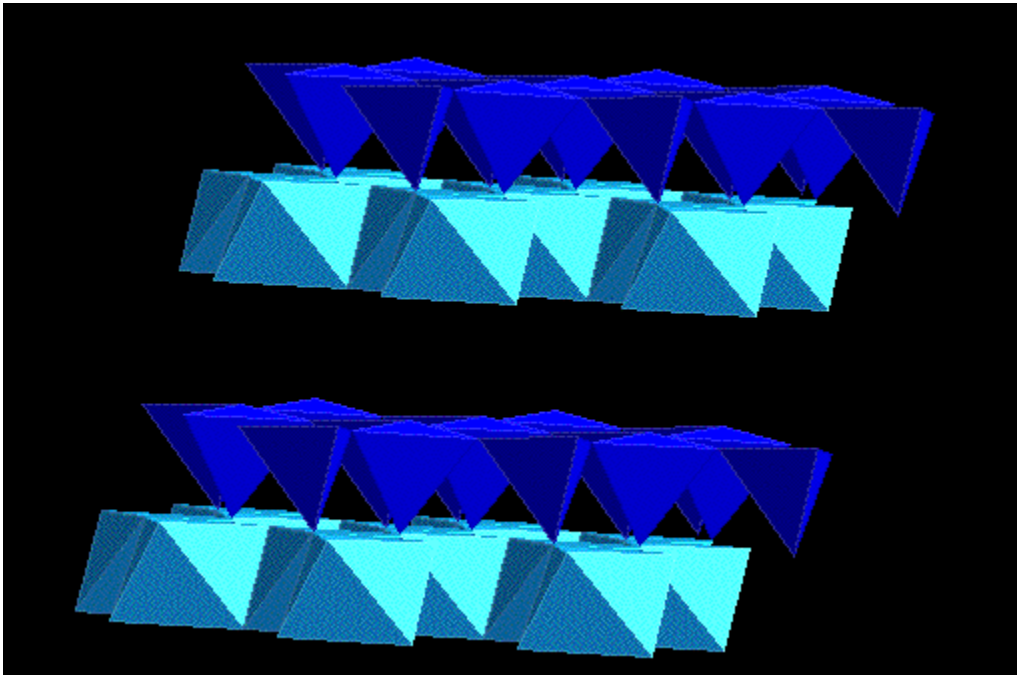


Terminologie de la structure des argiles

Tétraèdres et octaèdres

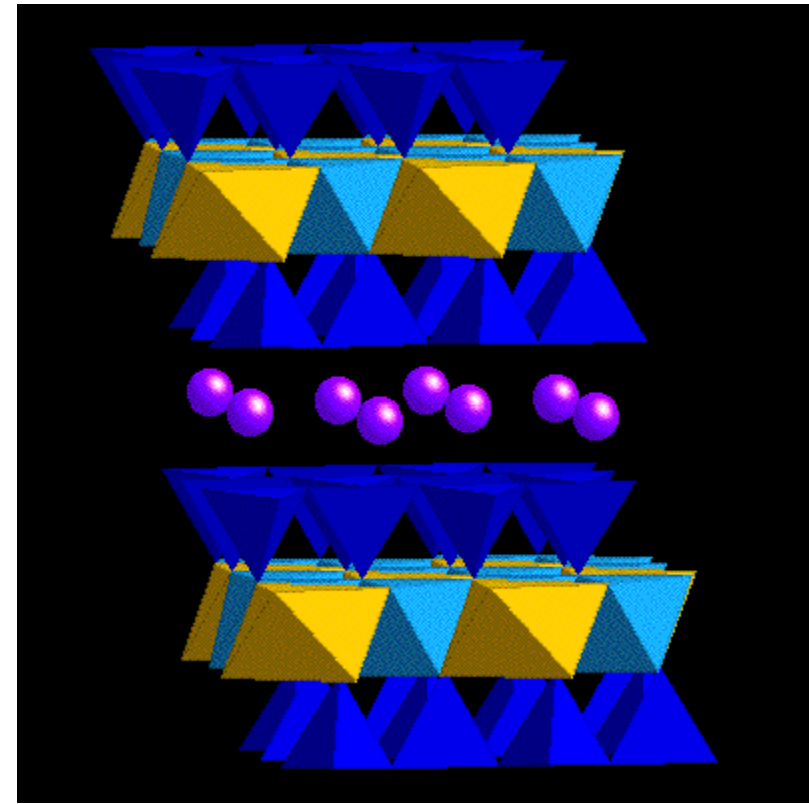


Représentation schématique de la structure d'un minéral argileux



TE/OC (1/1)

Kaolinite



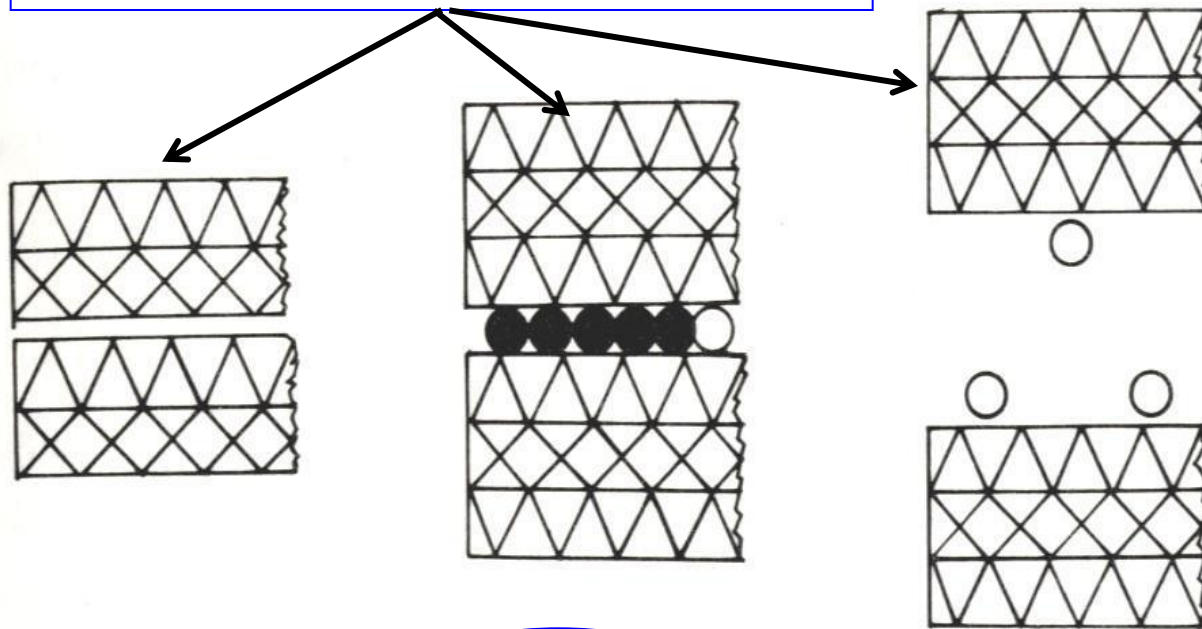
TE/OC/TE (2/1)

Montmorillonite ⇔ Vermiculites

2 grands
modèles

Schéma de la structure des feuilletts des trois principaux types d'argile

3 grandes familles



Echelle Å

FIG. 7 — Schéma de la structure des feuilletts de trois types d'argile.

△ Tétraèdre

◻ Octaèdre

● ion K^+ fixé

○ cation échangeable

Principaux types de minéraux argileux

• Modèles TE-OC (1/1)

- ✓ Pas de substitution dans les TE et OC (électriquement neutre):
 - Epaisseur constante des feuillets (7 Å) KAOLINITE

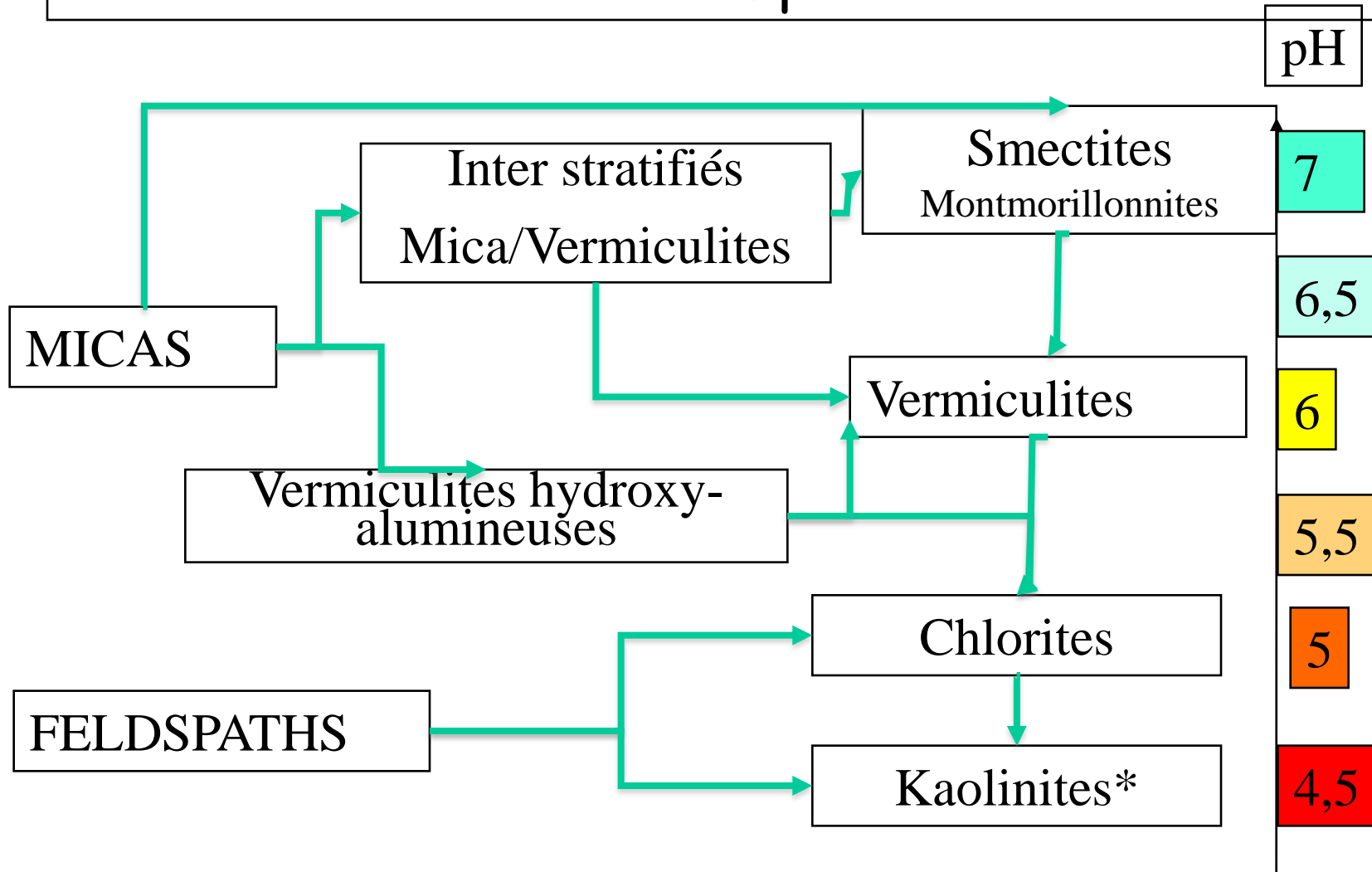
• Modèles TE-OC-TE (2/1)

- ✓ Forte substitution dans TE et OC (forte électronégativité),
 - Epaisseur constante des feuillets (10 Å), ILLITES
 - Epaisseur variable des feuillets (>15 Å), VERMICULITES
- ✓ Substitution modérée dans les OC (moyenne électronégativité)
 - Epaisseur variable des feuillets (> 20 Å) SMECTITES
MONTMORILLONITES

• Modèles TE-OC-TE-OC (2/1/1)

- ✓ Très forte substitution dans les TE & OC (électriquement neutre)
 - Epaisseur constante des feuillets (14 Å) CHLORITES

Conditions schématique de formation et d'évolution des argiles en milieu ouvert et climat tempéré



* Également en climats froids, qqs soit la roche d'origine

Les méthodes d'analyse des argiles

- Rx
- Microscopie électronique, à balayage
- Thermique
- Chimique

Spectres Rx

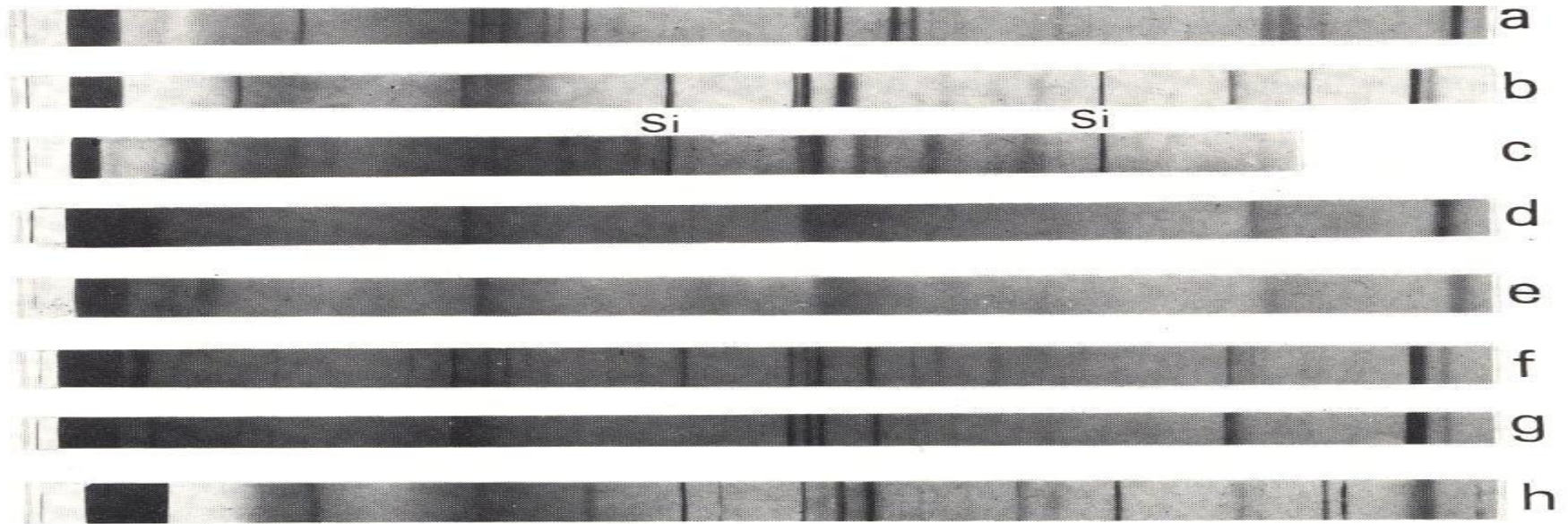
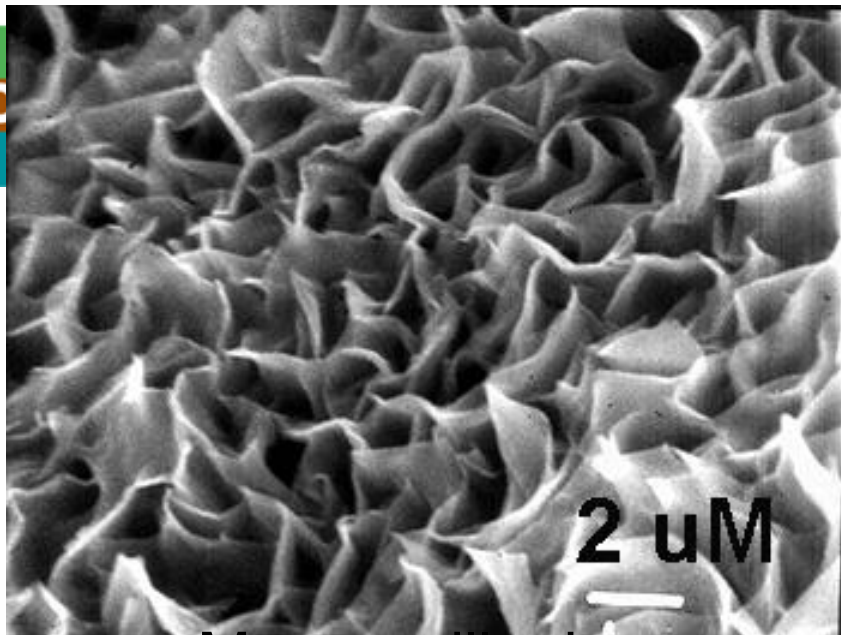


PLANCHE 1.

- | | | |
|---------------|------------------------|--------------------|
| a : Kaolinite | d: Hectorite-Ca | f : Saponite-Ca |
| b : Talc | e : Montmorillonite-Ca | g : Vermiculite-Mg |
| c : Sépiolite | | h : Chrysotile |
- L'étalonnage est fourni par du silicium (repéré sur le cliché)



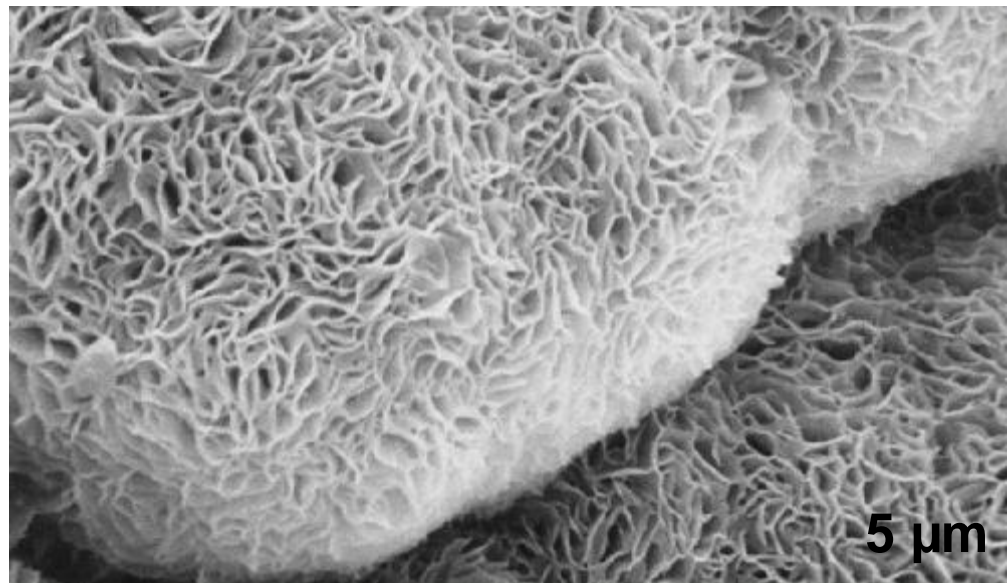
Montmorillonite



Kaolinite

Photos au microscope électronique

Smectite

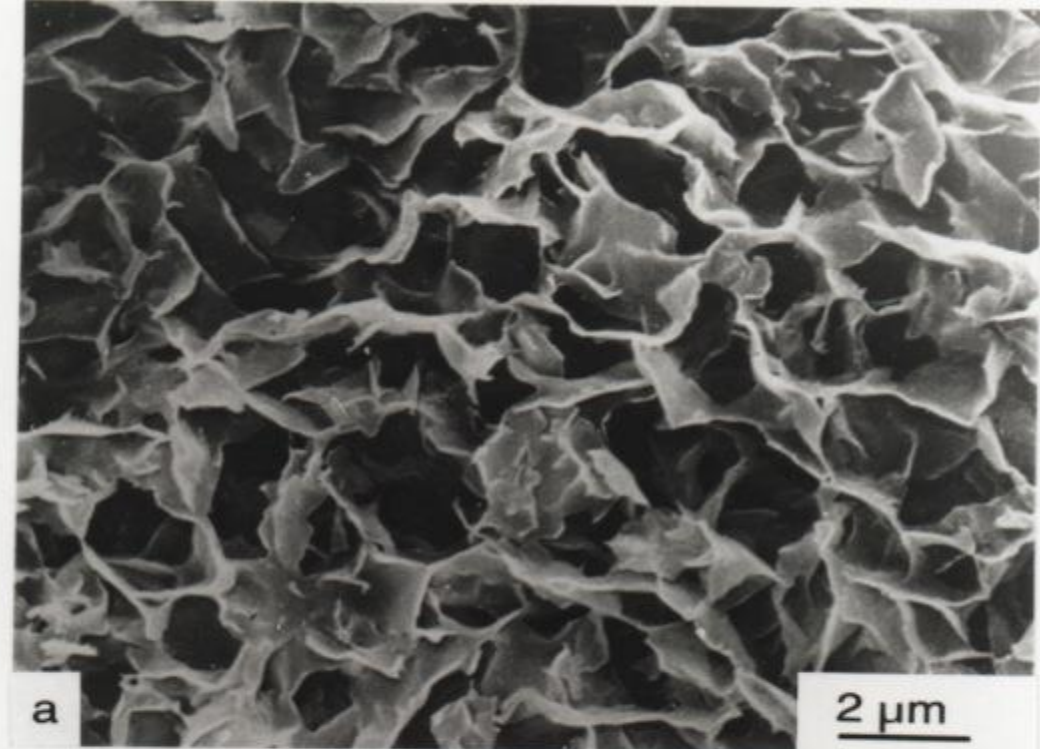


Microstructure
d'une argile à
trois teneurs en
eau (MEB)

0.032 bar

$w = 3.69$

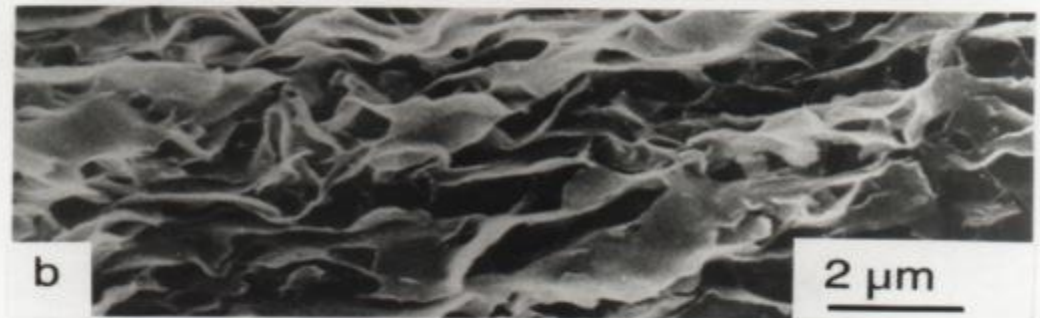
$1 + e = 9.8$



1 bar

$w = 1.14$

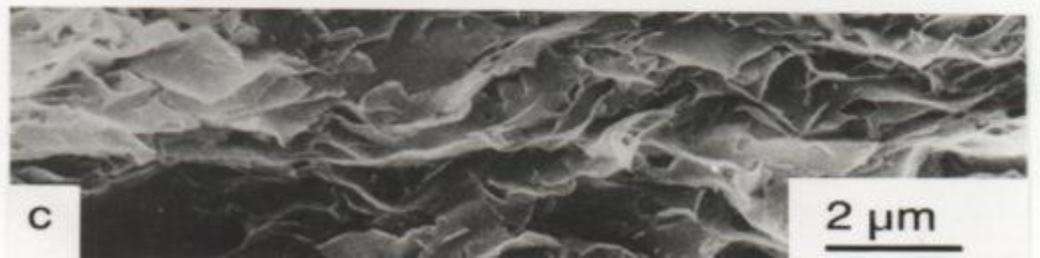
$1 + e = 4.0$



10 bars

$w = 0.82$

$1 + e = 3.2$



Formation CRAR



Analyse chimique des argiles

Moyenne	Montmorillonite	Vermiculite
SiO ₂	52,2	35,0
TiO ₂	Variable	Variable
Al ₂ O ₃	20,7	15, 1
Fe ₂ O ₃	2,5	4,8
FeO	Variable	0,7
NiO	0	3,8
CaO	2,1	0,3
MgO	3,3	21,1
K ₂ O	0,6	Variable
Na ₂ O	Variable	Variable
H ₂ O	17,9	19,3

Montmorillonite : $\text{Si}_4 \text{O}_{10} [\text{Al}_{(2-x)} \text{R}^{2+}_x] (\text{OH})_2 \text{CE}_x, n\text{H}_2\text{O}$

Vermiculite : $\text{Si}_{4-x} \text{Al}_x \text{O}_{10} [\text{R}^{2+}_{3-x} \text{R}^{3+}_y] (\text{OH})_2 \text{CE}_{x-y}, n\text{H}_2\text{O}$

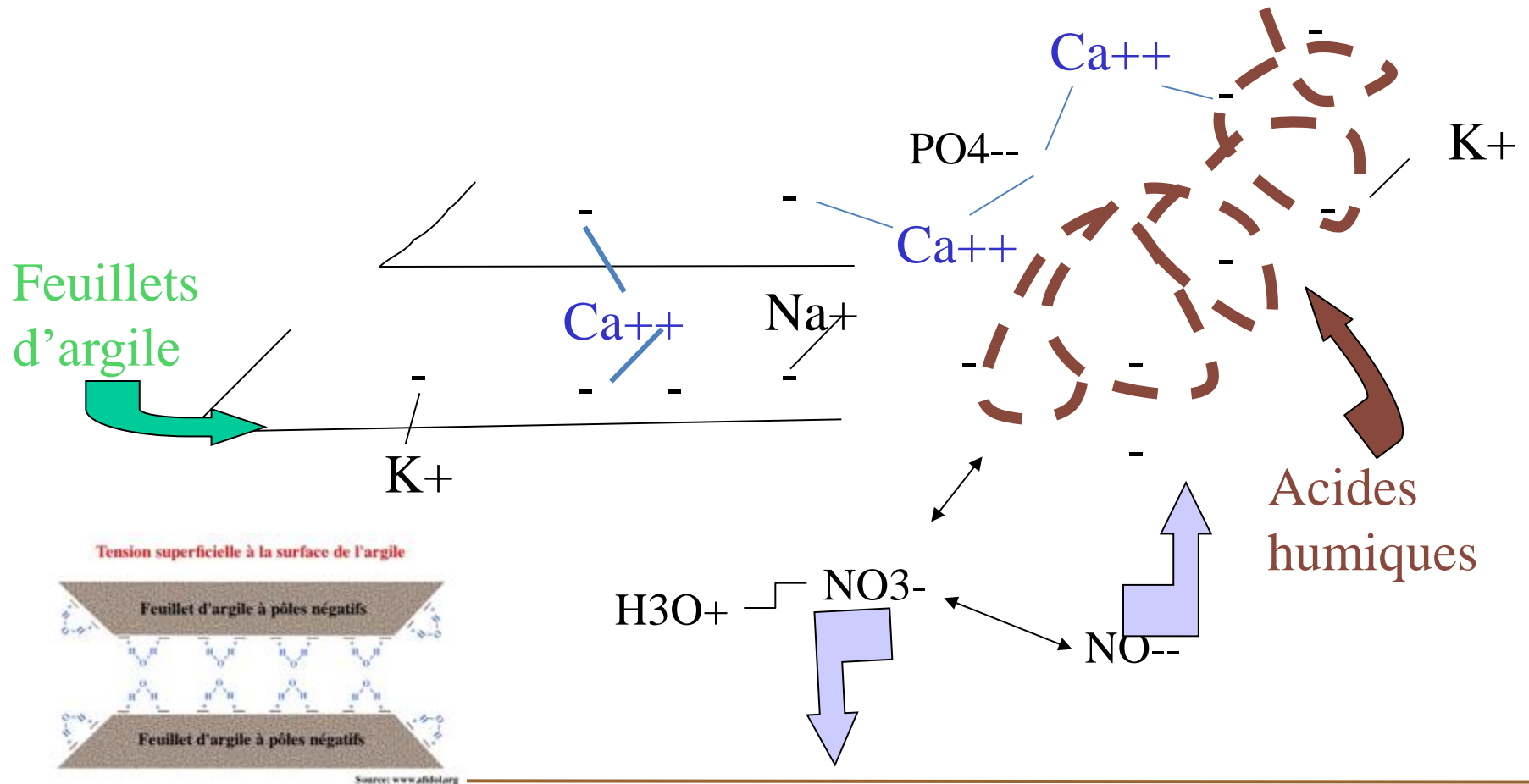
Les propriétés des argiles

(smectites, vermiculites)

- Surface de contact
 - Kaolinite : 5 à 20 m² / g
 - Montmorillonites: 720 m² /g
- Phénomène d'échange d'ions
 - Fixation temporaire de cations entre les feuillets en eq. avec solution du sol
 - Fixation, rétention de l'eau
- Flocculation importante vs dispersion

Phénomènes d'échanges dans le sol

Fixation réversible de l'eau et des sels dans le Complexe Argilo Humique du sol



Capacité d'Echange Cationique d'un sol ou « CEC » ou « T »

CEC = estimation analytique de la quantité de valences négatives (faibles) disponibles dans le complexe argilo humique du sol pour générer les phénomènes d'échanges

Unité de mesure = meq / 100g de sol ou mole (p+)/kg de sol

- **Kaolinite et Chlorites (très faible électronégativité) : CEC = 2 à 10 méq/100 g.**
- **Vermiculites et Illites (électronégativité faible): CEC = 40 à 60 méq/100 g**
- **Smectites et Montmorillonites (électronégativité forte): CEC = 110 à 125 méq/100 g**

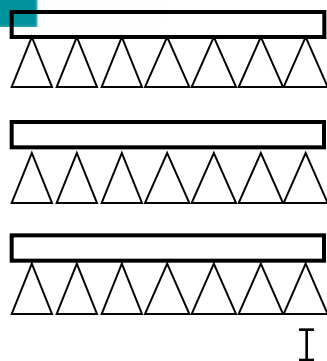
Floculation/dispersion des argiles

	Dispersé (feuilletés libres et mobiles)	Floculé (ponts calciques)
Etat humide	Force de répulsion entre les particules Pâte très visqueuse	Forces faibles ou nulles Pâte peu visqueuse
Etat sec	Prise en masse importante Macroporosité faible Microporosité importante	Peu de prise en masse, petites mottes Macroporosité augmente Microporosité diminue
Réhumectation rapide	Engorgement et constitution de boues	L'eau circule bien
Réhumectation lente	L'eau entre dans les particules et forme une masse pâteuse plastique et adhérente	L'eau pénètre mal dans les particules qui restent soudées
	Formation CRARA/ISARA/connaissance des sols	L'ensemble reste stable

Les minéraux argileux

Résumé

KAOLINITE (TE/OC) $\text{Al}_2\text{O}_3; 2\text{SiO}_2; 2\text{H}_2\text{O}$

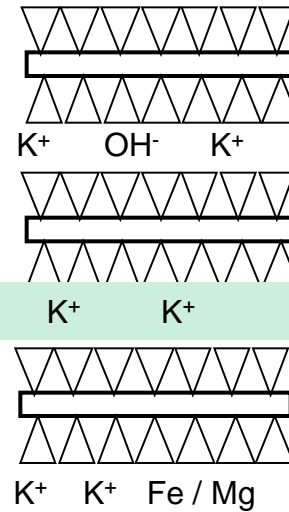


Couche octaédrique
Couche tétraédrique

Electroneutralité \Leftrightarrow **CEC très faible**

Espace inter foliaire: 7A

ILLITE- VERMICULITES (TE/OC/TE): K



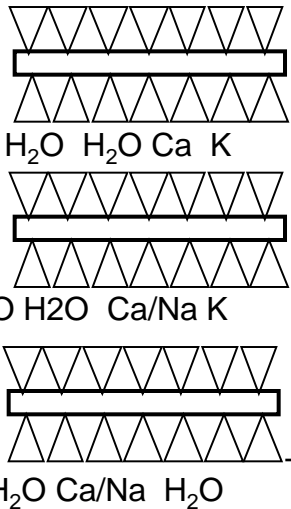
Substitution « importante »
de Si par Al / TE et Al par
Mg / OC

Forte électronégativité
compensée par fixation de
cations K^+ non
échangeables \Leftrightarrow Aimant
« fort » \Leftrightarrow **CEC modérée.**



Esp. Inter foliaire 10A

SMECTITES (TE/OC/TE) $2\text{Al}_2\text{O}_3; 8\text{SiO}_2; 2\text{H}_2\text{O}; \text{H}_2\text{O}$ (montmorillonite) $(\text{Mg}, \text{Ca}) \text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, 5\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$

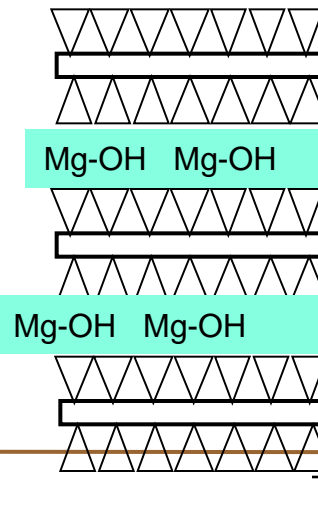


Substitution « modérée » de Al
par Mg et Fe / Oc

Faible électronégativité \Leftrightarrow
Aimant « faible » \Leftrightarrow **CEC forte**

Esp. Inter foliaire 14 \Leftrightarrow 17A

CHLORITE (TE/OC/TE/OC): $\text{Al}_2\text{O}_3; 2\text{SiO}_2;$ $2\text{H}_2\text{O}$



Substitution très
« forte » de Si & Al par
Fe et Mg / TE & OC

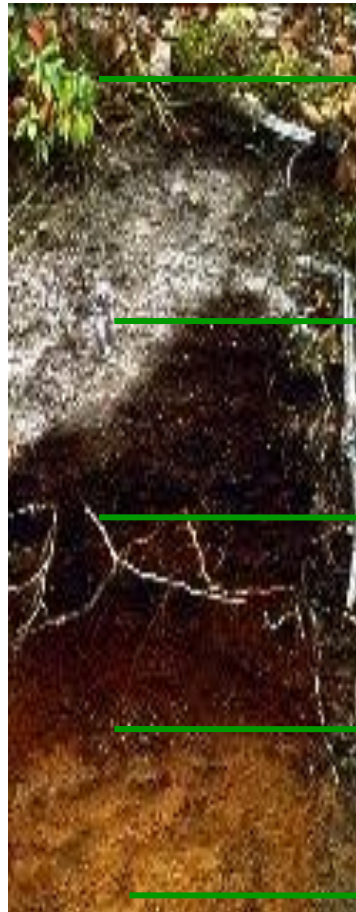
Forte électronégativité
compensés par fixation
de Mg-OH \Leftrightarrow Aimant
« très fort » \Leftrightarrow **CEC Très faible**

Esp. Inter foliaire 14A

Caractéristiques des principales argiles des sols

Type de feuillet	Épais. Å	Substitut.		Nom	CEC meq/100g	Interfeuillet			Surf. Spécif m ² /g
		TE	OC			Cations	Eau	Distance	
Te/Oc	7	non	-	Kaolinite	<10	non	Non	7 Å	10-30
Te/Oc/ Te	10	non	oui	Smectites Montmorillonite	100-120		Oui	Variable	800
				Illite	20-30	Divers K ⁺	Non	10 Å	100 à 200
		oui	oui	Vermiculite	80-100	fortem ⁺ fixé	Oui	Variable	400 à 500
				Chlorite	10-15	Mg ²⁺ , Al ³⁺	Non	14 Å	

Constituants minéraux du sol



Les différentes phases du sol
(rappels)

Les différents minéraux

Les minéraux argileux

Les sels et sesquioxides

Bilan

De quoi sont constitués les sols ?

Les sesquioxides

Oxydes hydratés métalliques généralement peu solubles

- **Sesquioxides d'aluminium:**

Incolores (sols très acides) - Al_2O_3 \rightleftharpoons feldspaths et les illites.

Gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$ - (sols tropicaux et équatoriaux \rightleftharpoons bauxites).



De quoi sont constitués les sols ?

Les sesquioxides ou oxydes hydratés métalliques

Goethite $\text{FeO}(\text{OH})$, ferrique beige

Engorgement



Réduction

Hydrates ferreux $\text{Fe}(\text{OH})_2$ soluble et mobile gris bleuté



Micro-migration

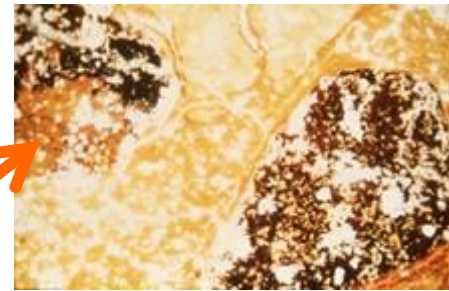
Hématite Fe_2O_3 , ferriques rouge peu soluble

Concentration



Oxydation

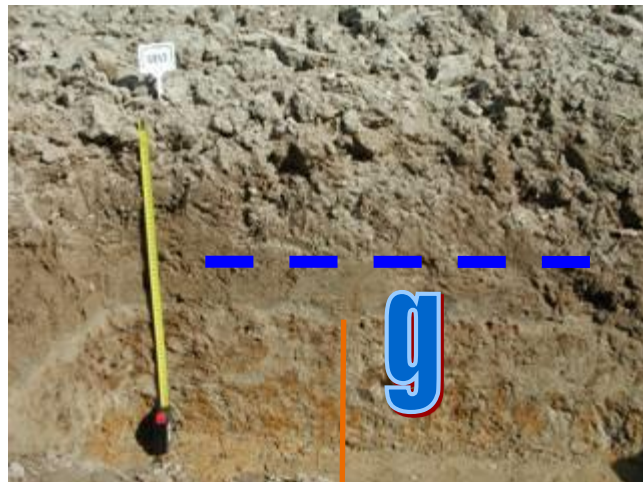
Concrétions de fer et de manganèse (insolubles)



L'hydromorphie des sols



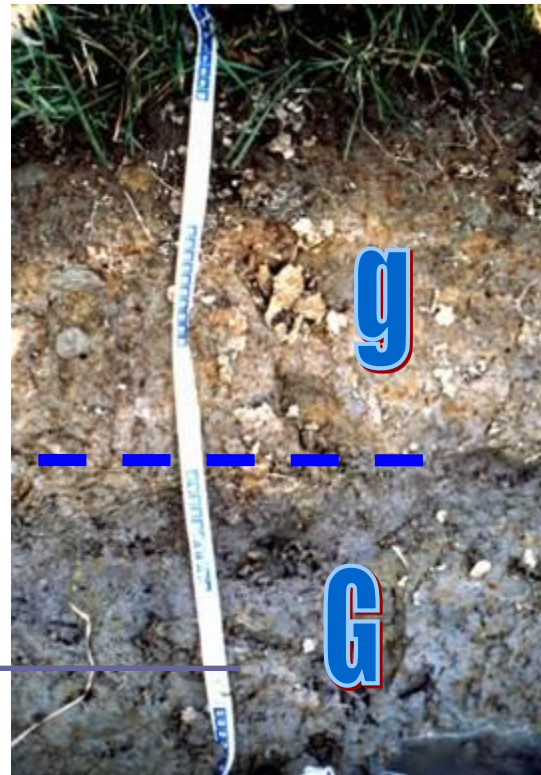
Traces morphologiques de présence d'eau stagnante Gley (G) et Pseudo Gley (g)



Source: INRA Orléans

Horizon rédoxique (g), à saturation
en eau temporaire

Horizon réductique
temporairement réoxydé
(Go), à saturation en eau
quasi-permanente



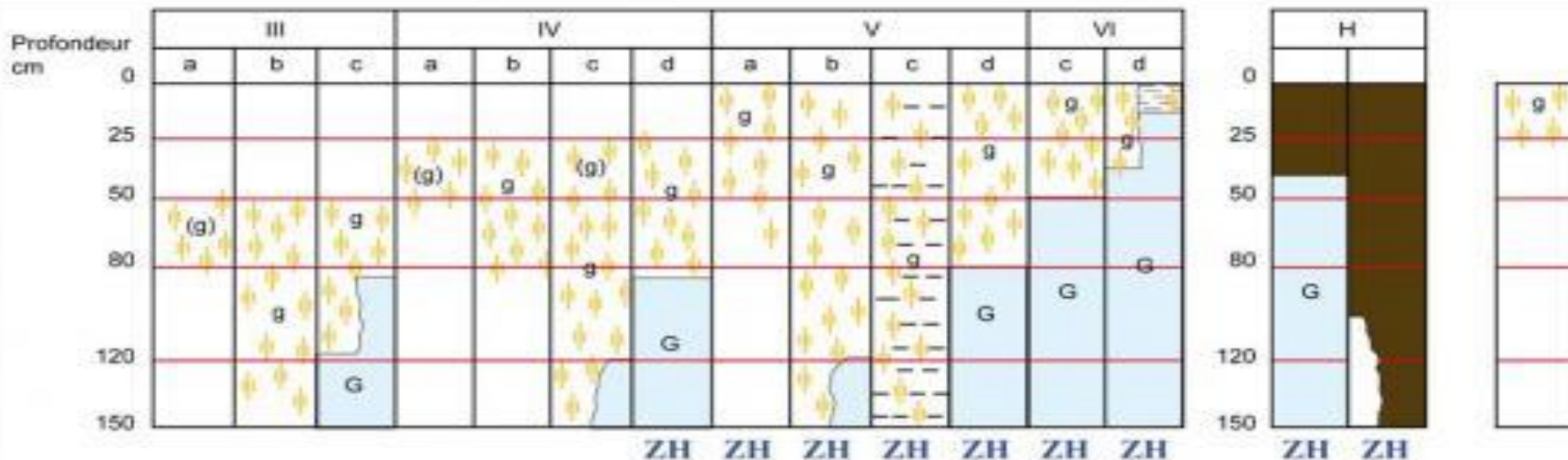
Source: C Walter (ENSA-INRA)

Horizon réductique sensu
stricto (Gr), à saturation en
eau permanente



L'eau dans le sol

Les classe d'hydromorphie



Morphologie des sols correspondant à des "zones humides" (ZH)

- horizon rédoxique peu marqué (g)
- horizon rédoxique marqué g
- Nappe
- horizon réductique G
- horizon histique H

D'après les classes d'hydromorphie du Groupe d'Etude des problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA, 1981)

De quoi sont constitués les sols ?

Les sels

✓ Calcium

- carbonate de calcium → Ponts calciques



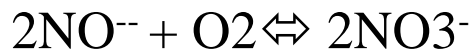
Peu soluble

très soluble

- sulfate de calcium (gypse) Ca SO_4

✓ Azote

- Nitrates et nitrites



✓ Autres sels

