Les sols : origine, structure, propriétés et biodisponibilité des éléments traces

Guillaume Echevarria

Laboratoire Sols et Environnement

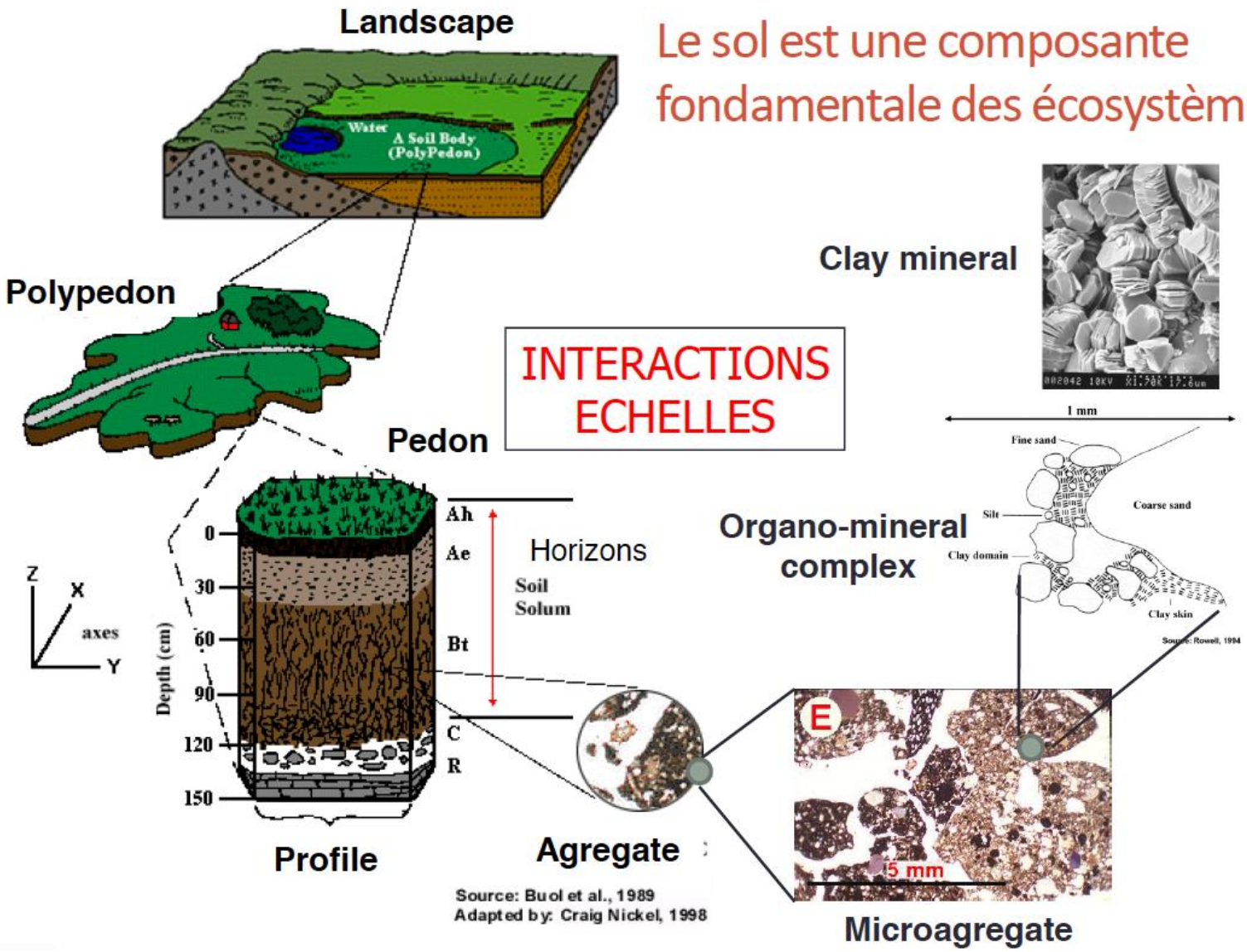
UMR 1120 INRA – Université de Lorraine-OTELo – LABEX Ressources 21

Nancy, FRANCE

Photos: G. Echevarria

C’est quoi un sol ?

Le sol est une composante fondamentale des écosystèmes



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

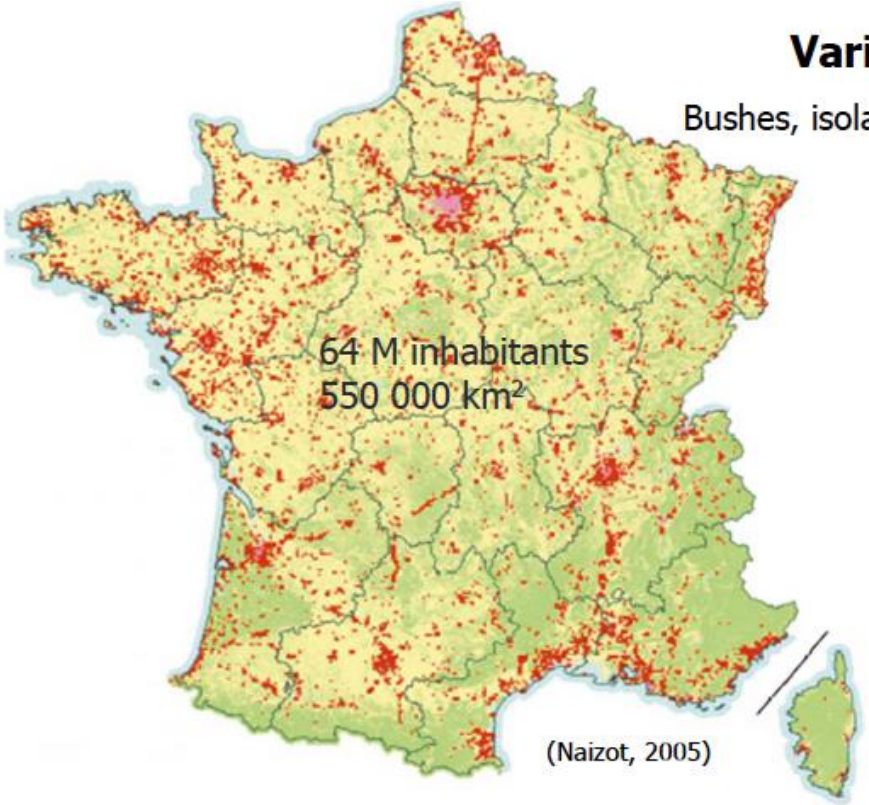
- **production de biomasse (alimentaire et non alimentaire)**
  - réservoir d'éléments nutritifs ; support des racines
- **réservoir de biodiversité**
  - habitats, espèces et gènes
- **filtration, transformation des substances**
  - grands cycles -C, N, eau-;
  - éléments nutritifs, contaminants
- **stockage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

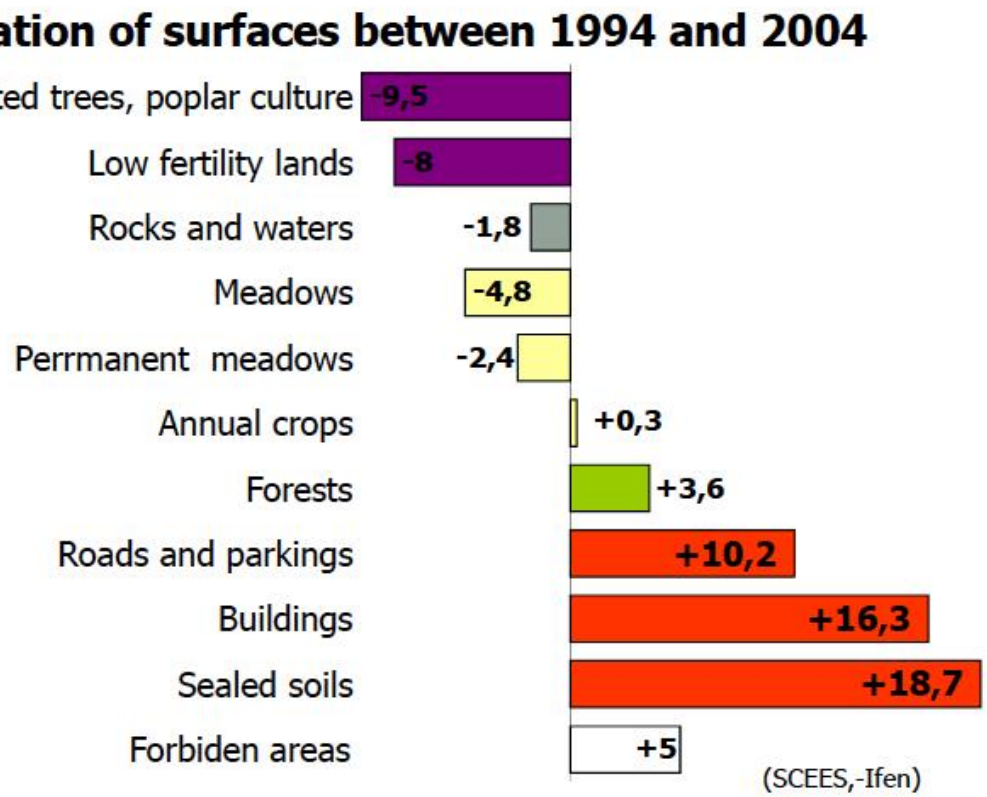
Les menaces pesant sur la qualité et le fonctionnenement des sols

- Erosion
- Diminution de la teneur en matière organique
  - Diminution de l'effet tampon des sols sur le changement climatique (Gt de C fixés dans les sols)
  - Diminution de la qualité des sols (Fertilité, resistance à l'érosion, augmentation du travail du sol)
- Urbanisation et artificialisation des surfaces (Perte des fonctions des sols)
- Dégradation chimique et biologique :
  - Salinisation (e.g. Ouzbekhistan)
  - Contamination (e.g. Chine)

<u>Et pourtant, il n'y a pas de loi sur la protection des sols en France</u>

Le développement urbain menace les sols agricoles





Chiffres en Europe :

- 75% de la population européenne vit en ville
- 78% : augmentation de la surface urbaine
- 2.3% de l'Europe est scellée (200m² par citoyen; plus de 5% en Allemagne)
- 250 ha disparaissent chaque jour (2000-2006)
- Le scellement affecte principalement les sols fertiles

Une histoire de sol…

- La roche mère et sa composition minéralogique
- Le climat et la végétation
- Les produits d'altération abiotique et biotique des minéraux
- Les cycles biogéochimiques des éléments majeurs… et mineurs
- Les processus pédogénétiques : la formation d'un complexe « argilo-humique »
- Un fonctionnement et des propriétés particulières
- Des réactions à des contaminations variables en fonction des propriétés : la biodisponibilité des contaminants
- Une variabilité spatiale très forte

Que sont les péridotites ?

- Peridodites (Roches ultrabasiques/ultramafiques) sont des constituants du manteau supérieur océanique (ophiolites).
- Ces roches sont plus denses et plus riches en Mg + Fe et plus pauvres en Si + Al que la croûte continentale. Elle contiennent également des éléments métalliques plus lourds comme le Mn, Ni, Co, Cr (parfois Cu et Zn).
- Elles sont formées de minéraux mafiques : Olivines, Pyroxènes et Spinelles (e.g. Chromite, Magnetite)

OLIVINES
Nesosilicates
Formule:
$(Mg, Fe)_2SiO_4$
Mg-Forstérite
Fe-Fayalite
Dunites
(>90% olivine)

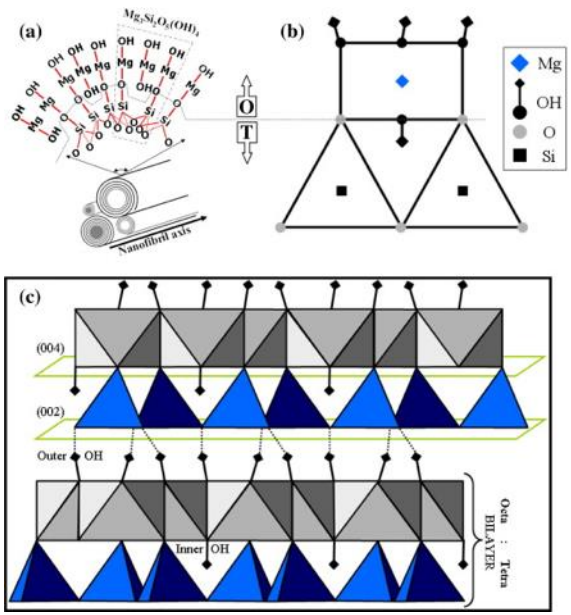
(ORTHO) PYROXENES
Inosilicates
Formule:
$(Mg, Fe)_2Si_2O_6$
Enstatite
Pyroxenites
(>90% orthopyrox)

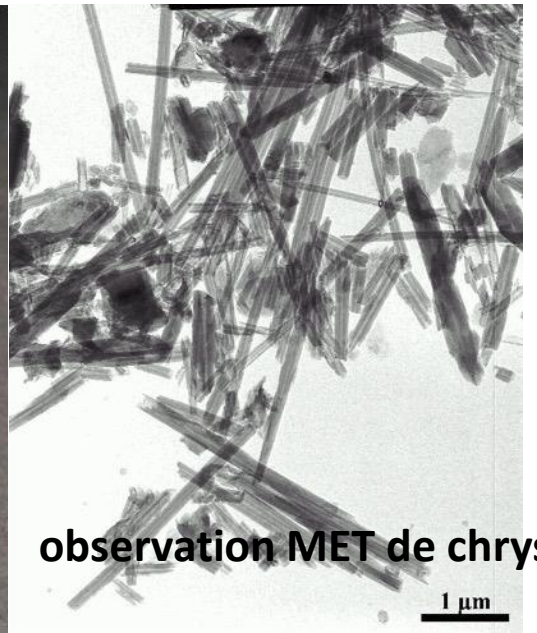
Qu'est ce que la serpentinisation ?

- **Le métamorphisme** des peridotites sous hydratation resulte dans la formation de **serpentinites.**
- **Mécanismes chimiques de la formation de serpentines :**
  - $3Fe_2SiO_4 + 2H_2O \rightarrow 2Fe_3O_4 + 3SiO_2 + 2H_2$
    Fayalite Magnetite
  - $3Mg_2SiO_4 + SiO_2 + 4H_2O \rightarrow 2Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
    Forsterite Serpentine
  - $2Mg_2SiO_4 + 3H_2O \rightarrow Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + Mg(OH)_2$
    Forsterite Serpentine Brucite

Serpentinisation des péridotites

- La serpentine est un phyllosilicate magnésien possédant une structure 1:1
- Les serpentines, chlorites, talcs et la magnétite (spinelle) sont les minéraux prédominants des serpentinites





observation MET de chrysotile

Quelles sont les principales tendances de la pédogenèse sur roche mère ultramafique ?

En climat tempéré ?

Altération et bilans élémentaires dans des sols ultramafiques sous climat froid à tempéré

J. Kierczak et al. / Geoderma 142 (2007) 165–177

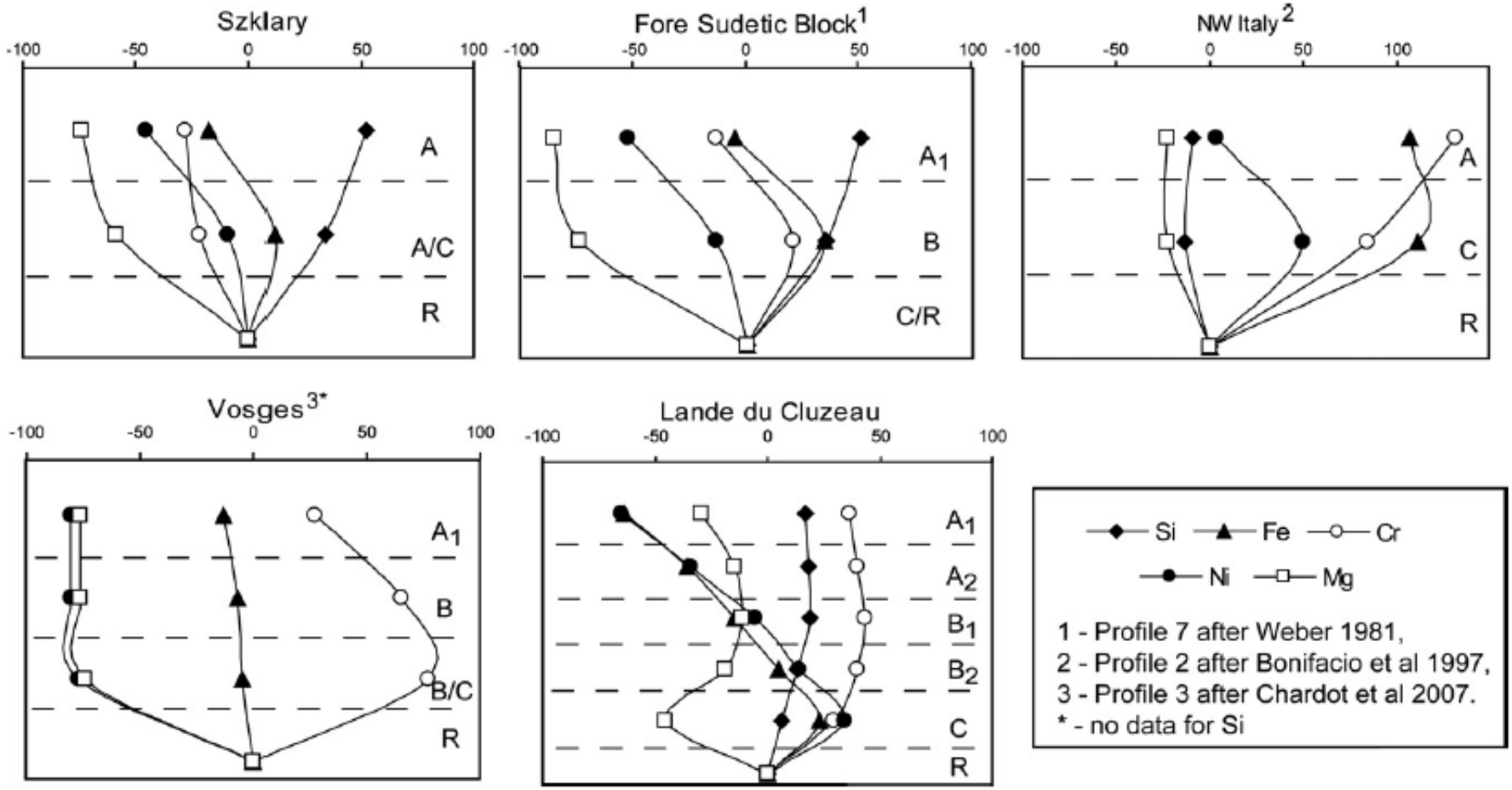
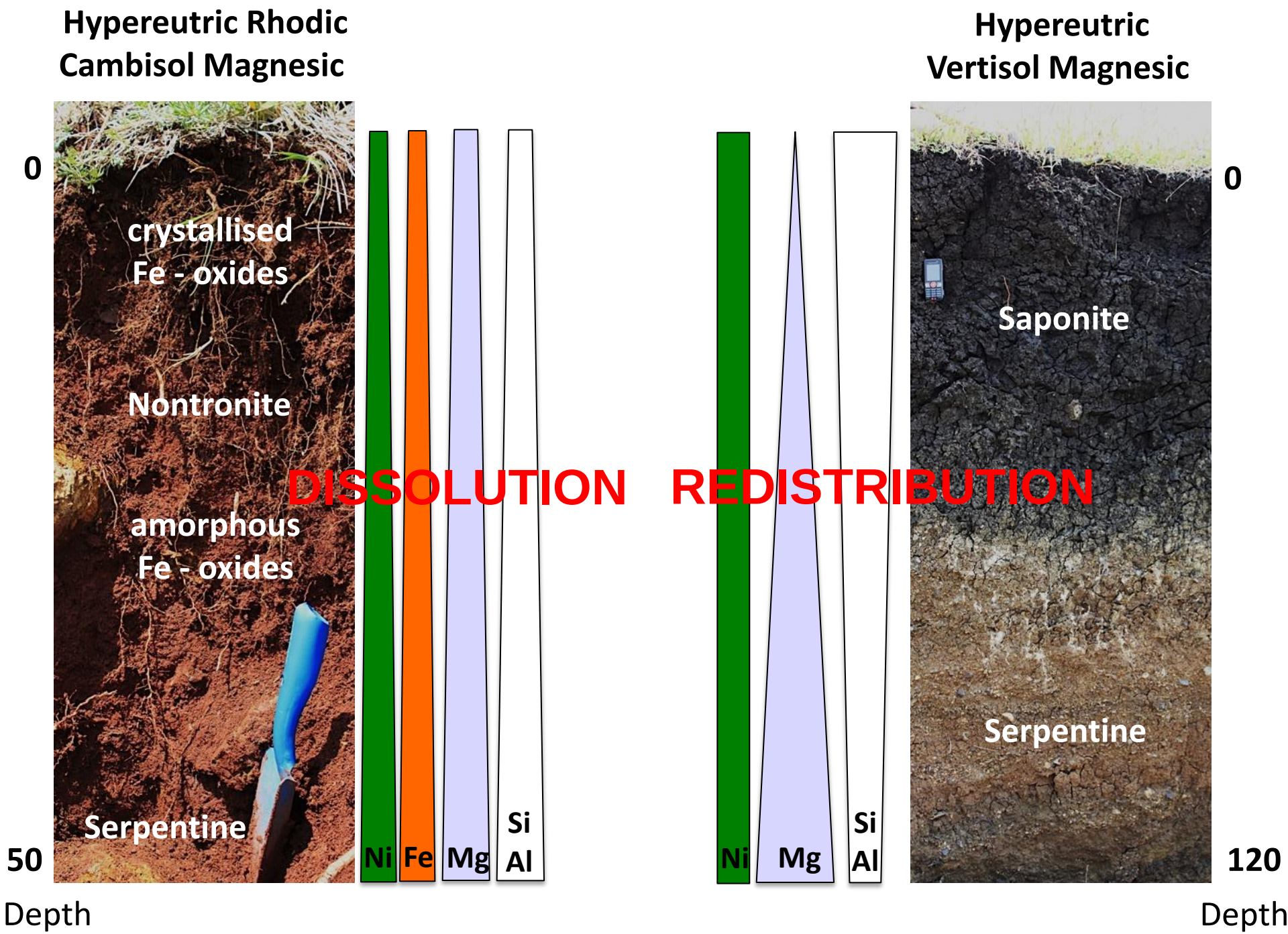


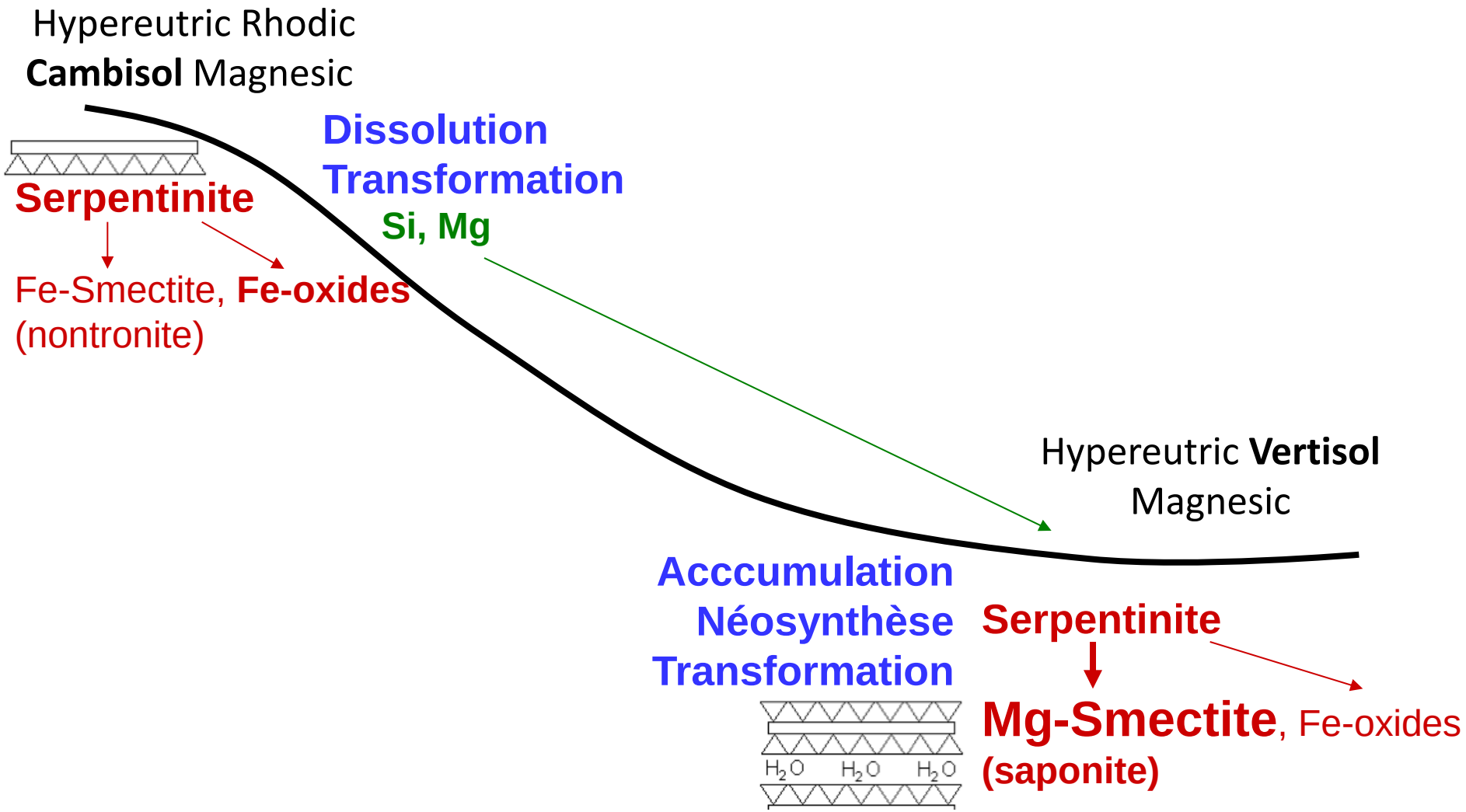
Fig. 5. Relative variations of temperate climate serpentine soils chemistry. Chemical analyses come from Bonifacio et al. (1997), Chardot et al. (2007), Weber (1981) and from investigated soil from the Szklary Massif and serpentine soil from the Lande du Cluzeau (Massif Central).

Le complexe ultramafique de Shebenik-Pogradec – Harzburgite serpentinisée (Albanie)

Photo G. Echevarria


Hypereutric Rhodic
Cambisol Magnesic
Hypereutric
Vertisol Magnesic
0
crystallised
Fe - oxides
Nontronite
amorphous
Fe - oxides
Serpentine
50
Depth
Ni
Fe
Mg
Si
Al
DISSOLUTION
REDISTRIBUTION
Ni
Mg
Si
Al
Saponite
Serpentine
0
120
Depth

Pédogenèse sur serpentinite en climat méditerranéen : un bilan élémentaire, minéral et pédologique

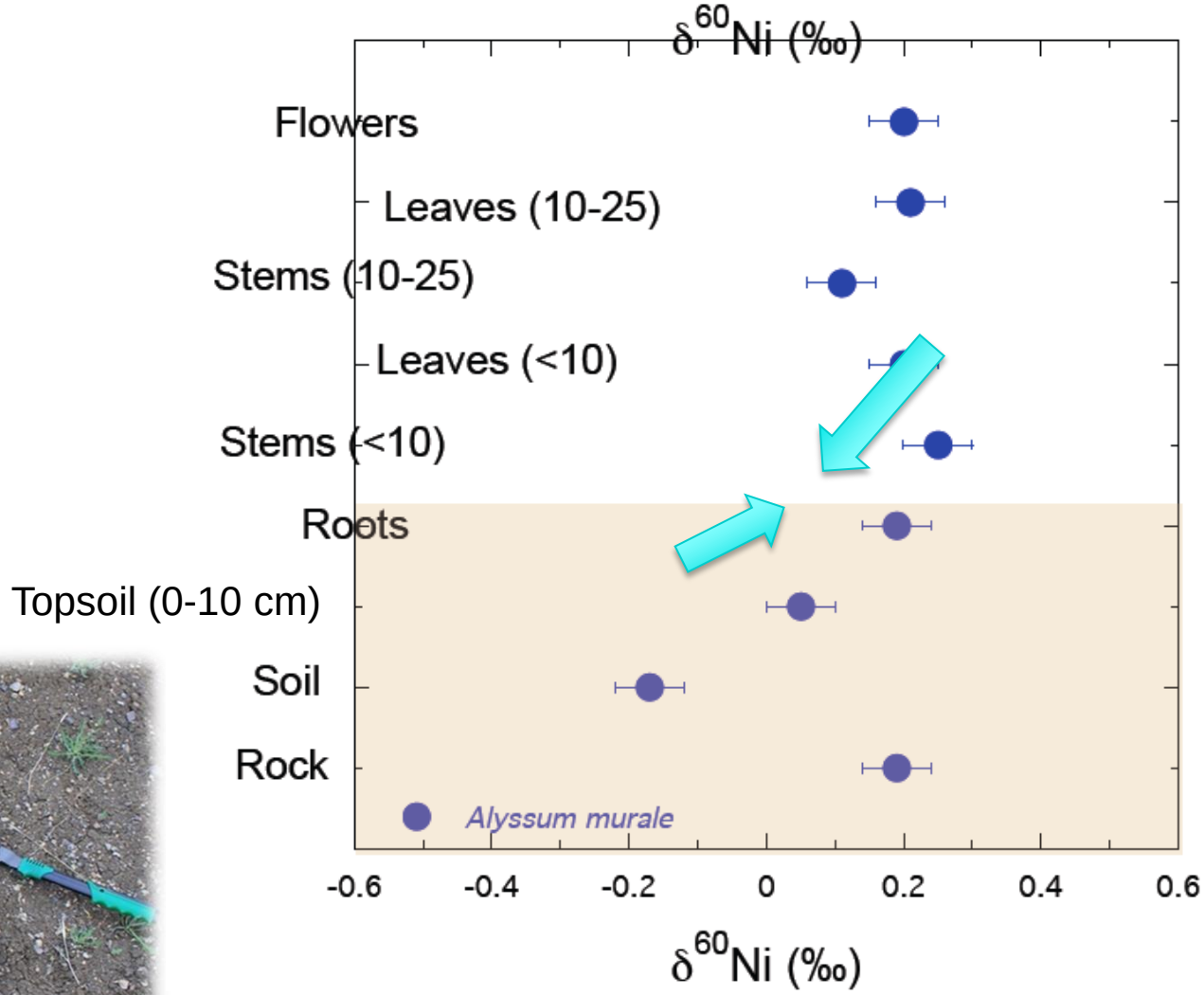


Recyclage biogéochimique des éléments en milieu ultramafique (Vertisol)

	Ni %	Ca %	K %
Leaves	1.90	3.57	1.50
Litter (same year)	0.92	2.06	0.53
Soil under litter (0-3 cm)	0.30 a	0.72	0.34
Soil without plant (No litter)	0.28 b	0.69	0.32

Echevarria, 2018

Recyclage biogéochimique des éléments en milieu ultramafique

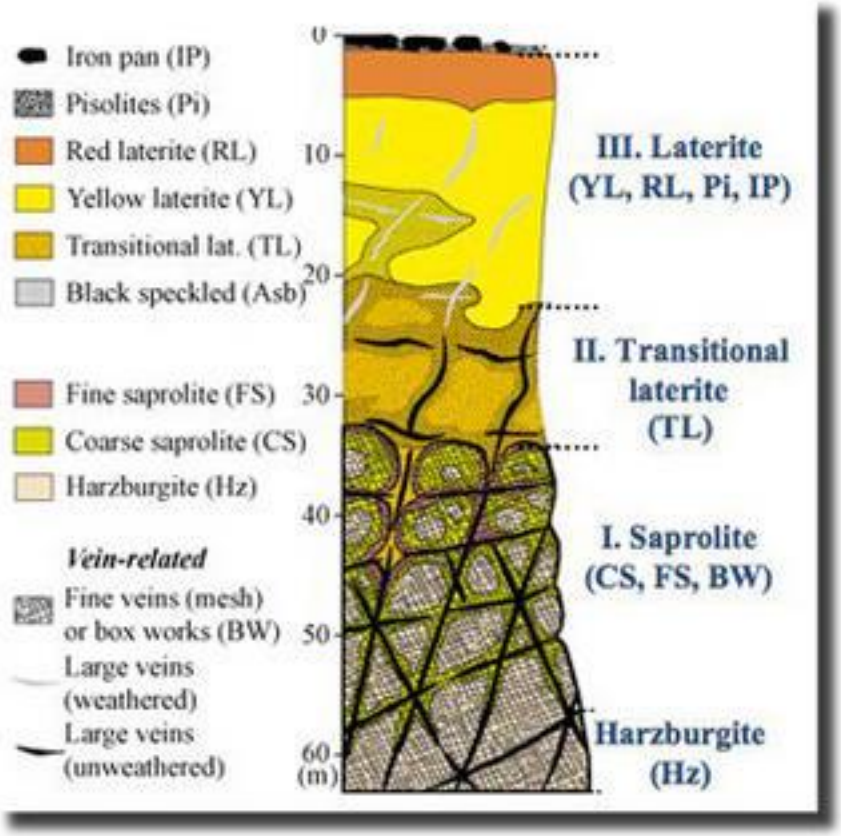


Estrade et al., 2015

Quelles sont les principales tendances de la pédogenèse sur roche mère ultramafique ?

En climat tropical humide ?

Latérites ultramafiques (Nouvelle Calédonie)



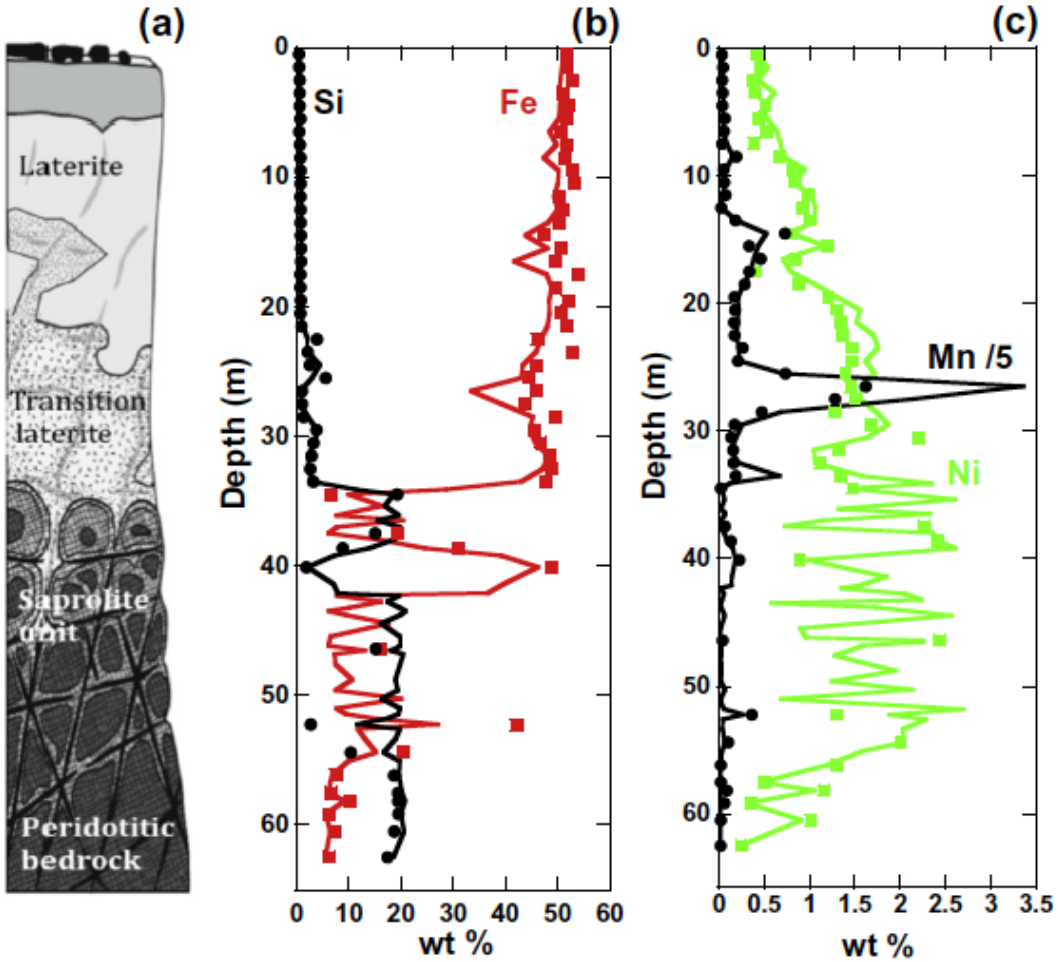
Source : nouvelle-caledonie.ird.fr

Latéritisation: Goro – Prony (Nouvelle Calédonie)

Photos : Guillaume Echevarria

Ségregation du Fe, Mn et Ni dans les latérites sur peridotite (N. Calédonie)

G. Dublet et al. / Geochimica et Cosmochimica Acta 95 (2012) 119–133



Leptosols sur cuirasse latéritique continue (Goro, NC)

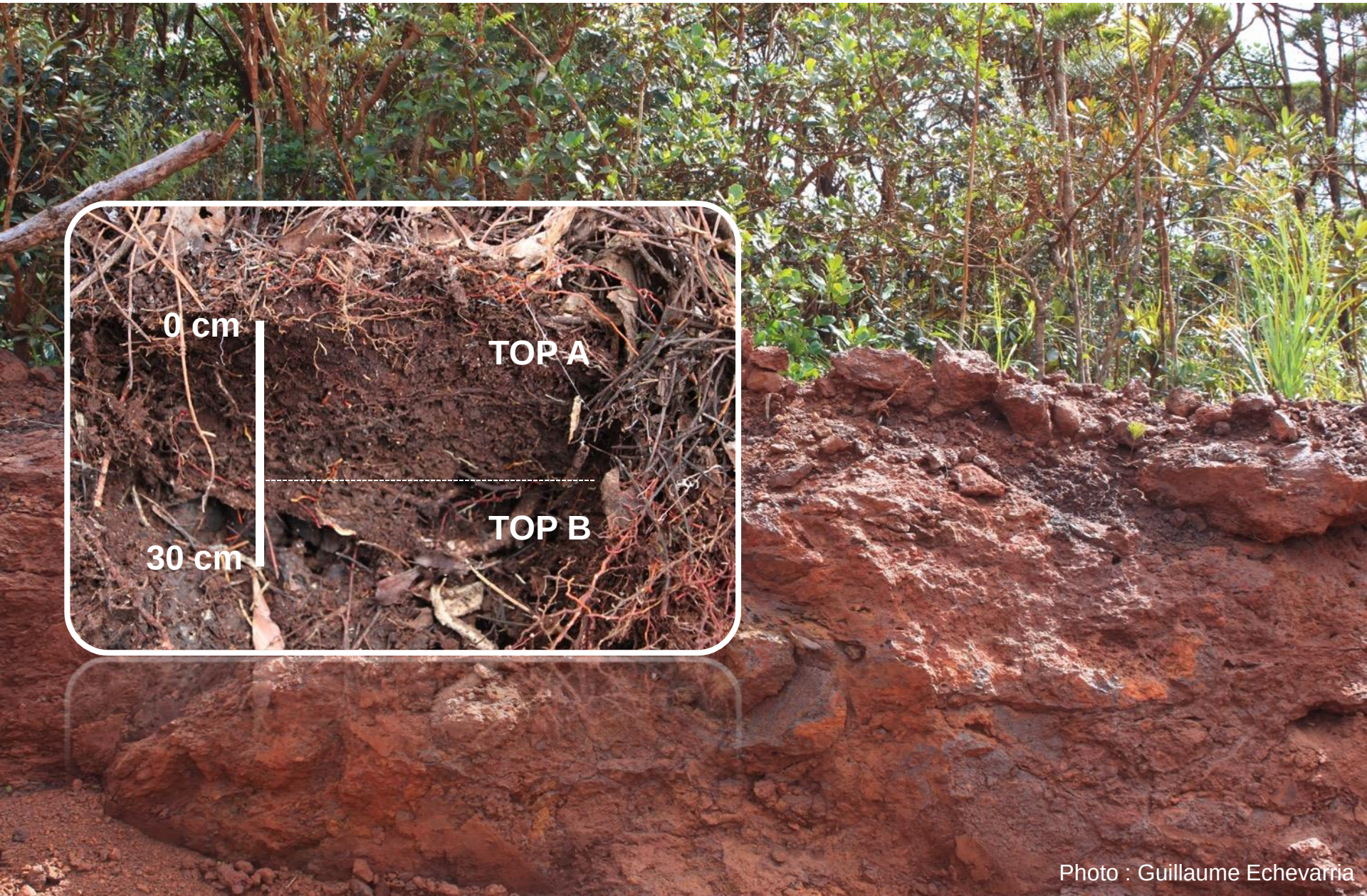
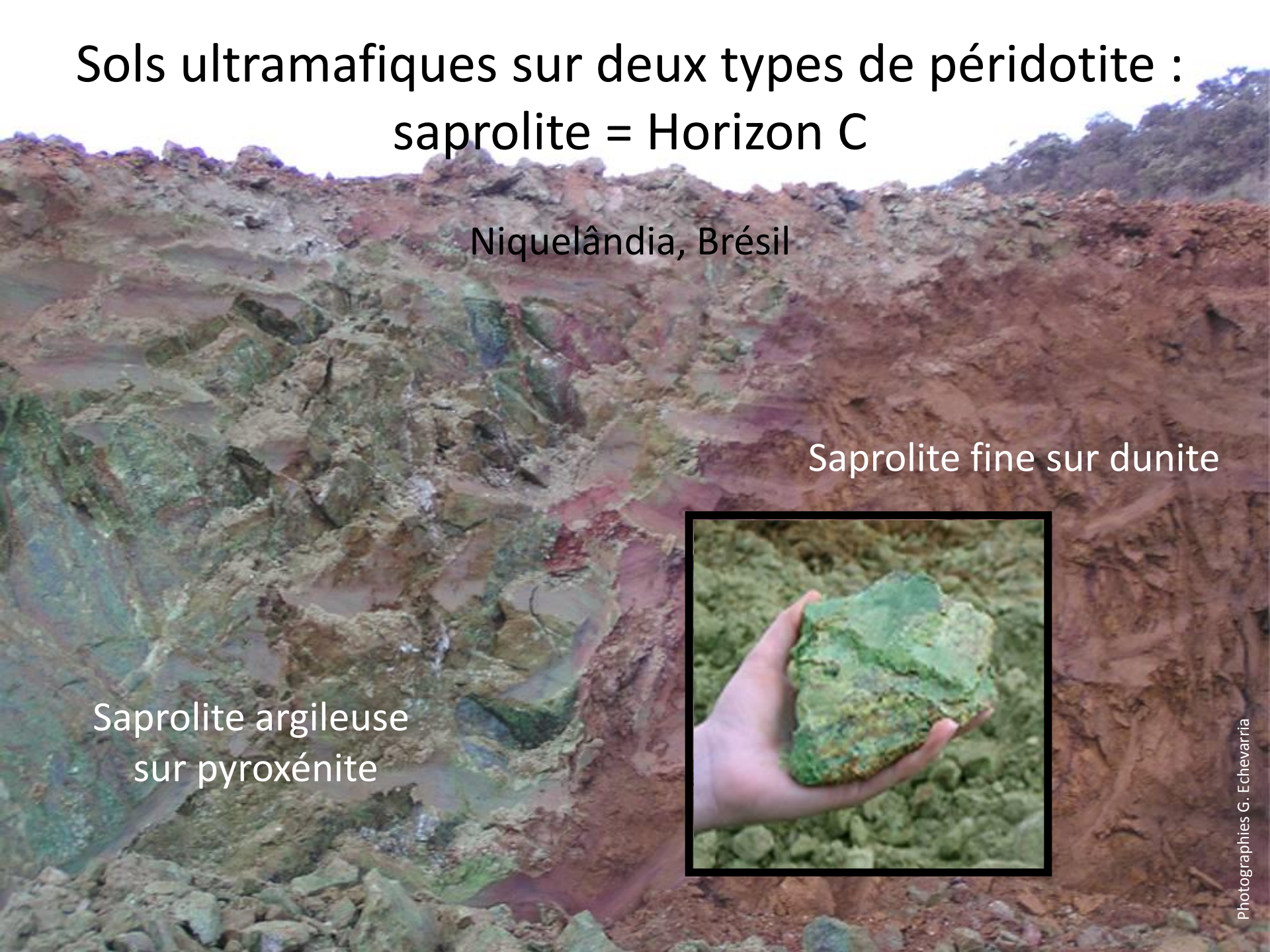


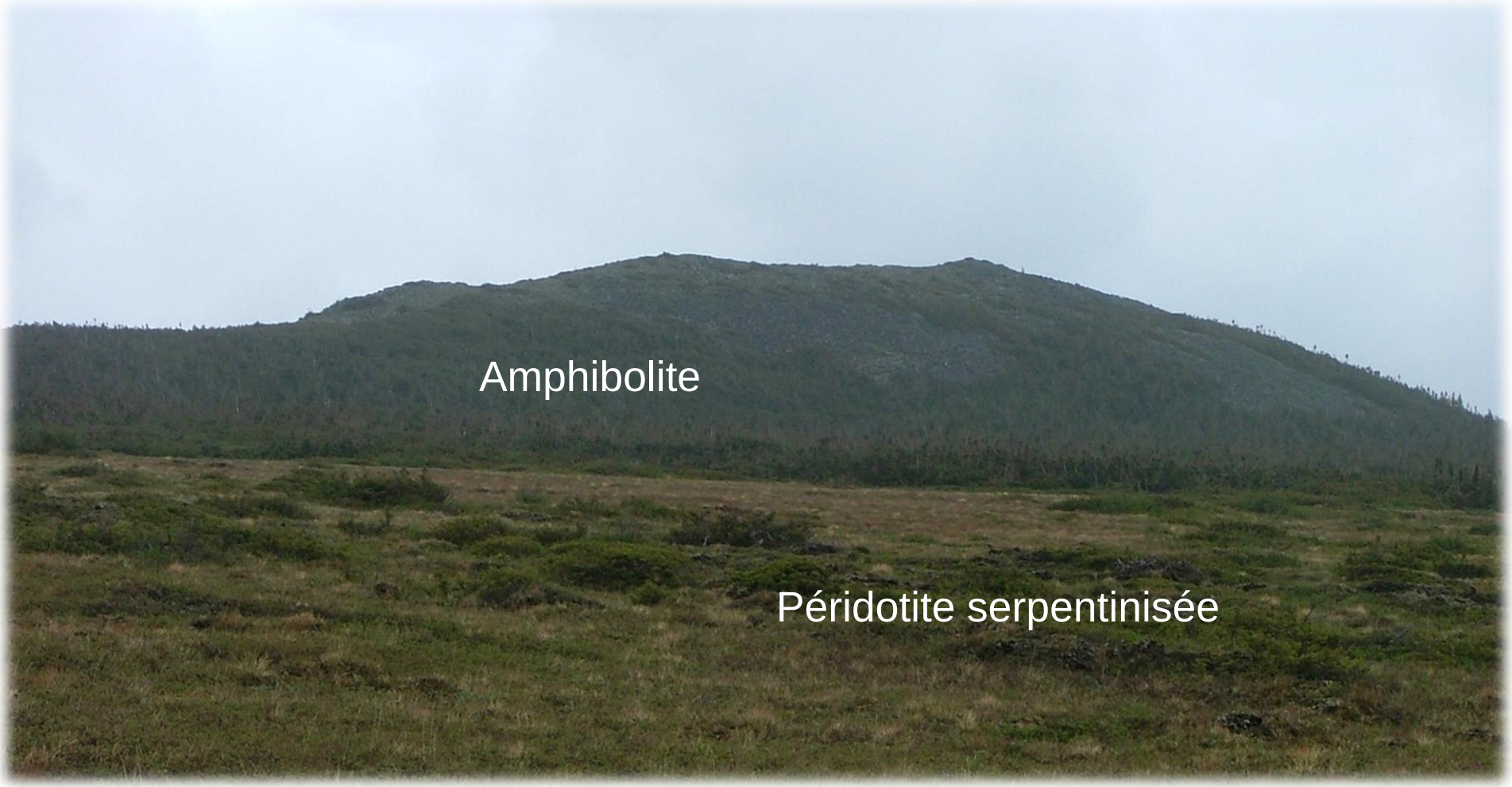
Photo : Guillaume Echevarria

Sols ultramafiques sur deux types de péridotite : saprolite = Horizon C

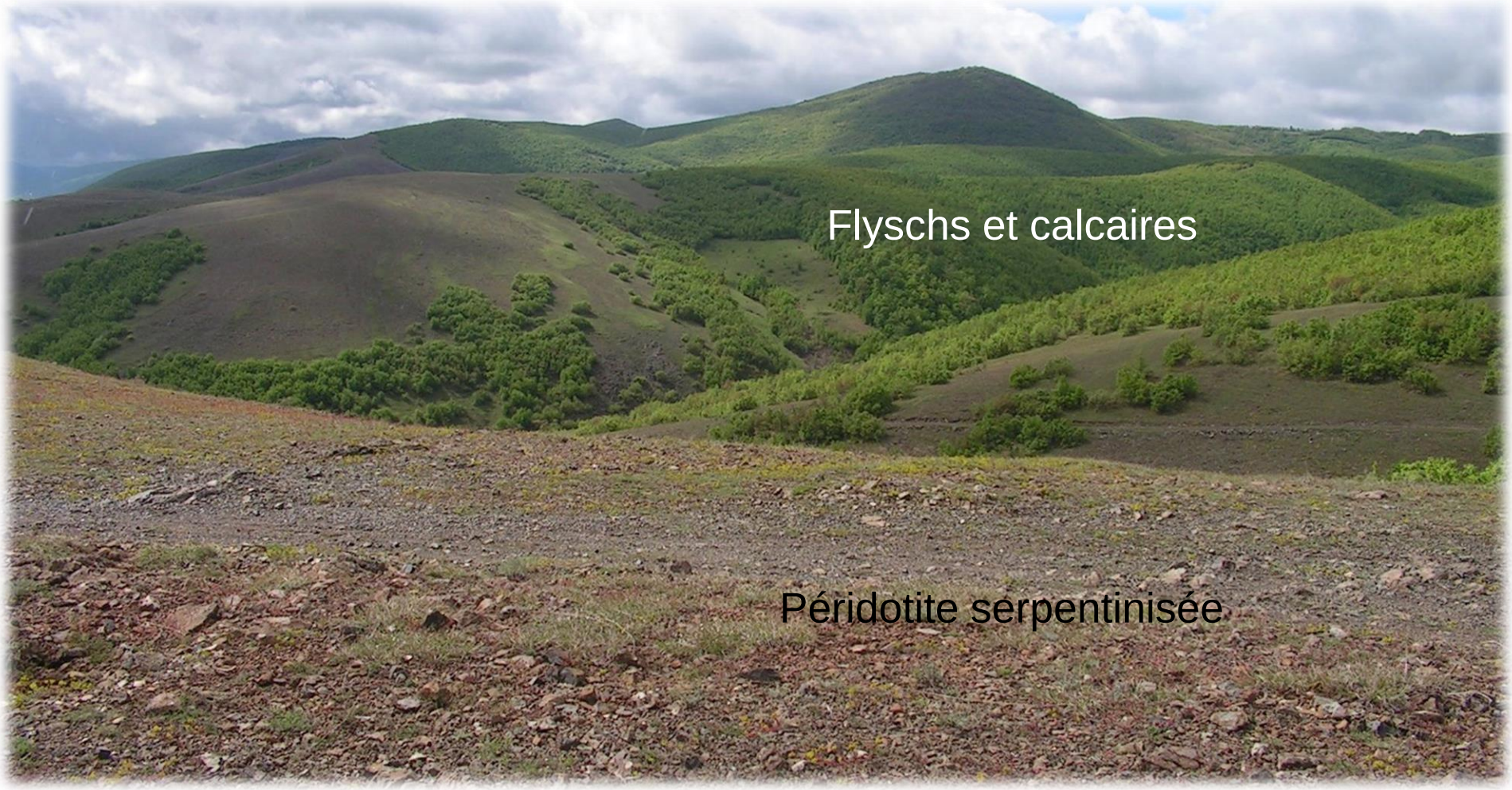


Leptosols sur serpentinite (Kinabalu Park, Sabah, Bornéo)

Climat boréal – Mont Albert (1000 m) Québec, Canada

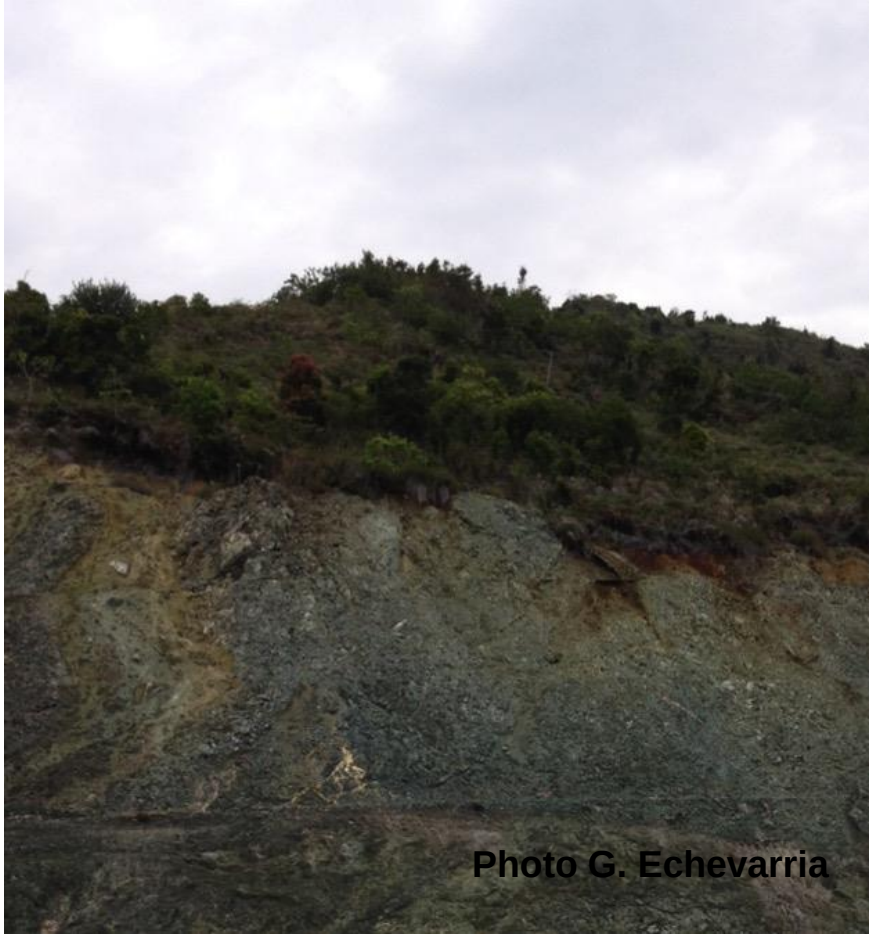


Temperate climate – Kishnarekë (200 m) Kosovo, Balkans



Climat tropical : Kinabalu Park (Malaysie)

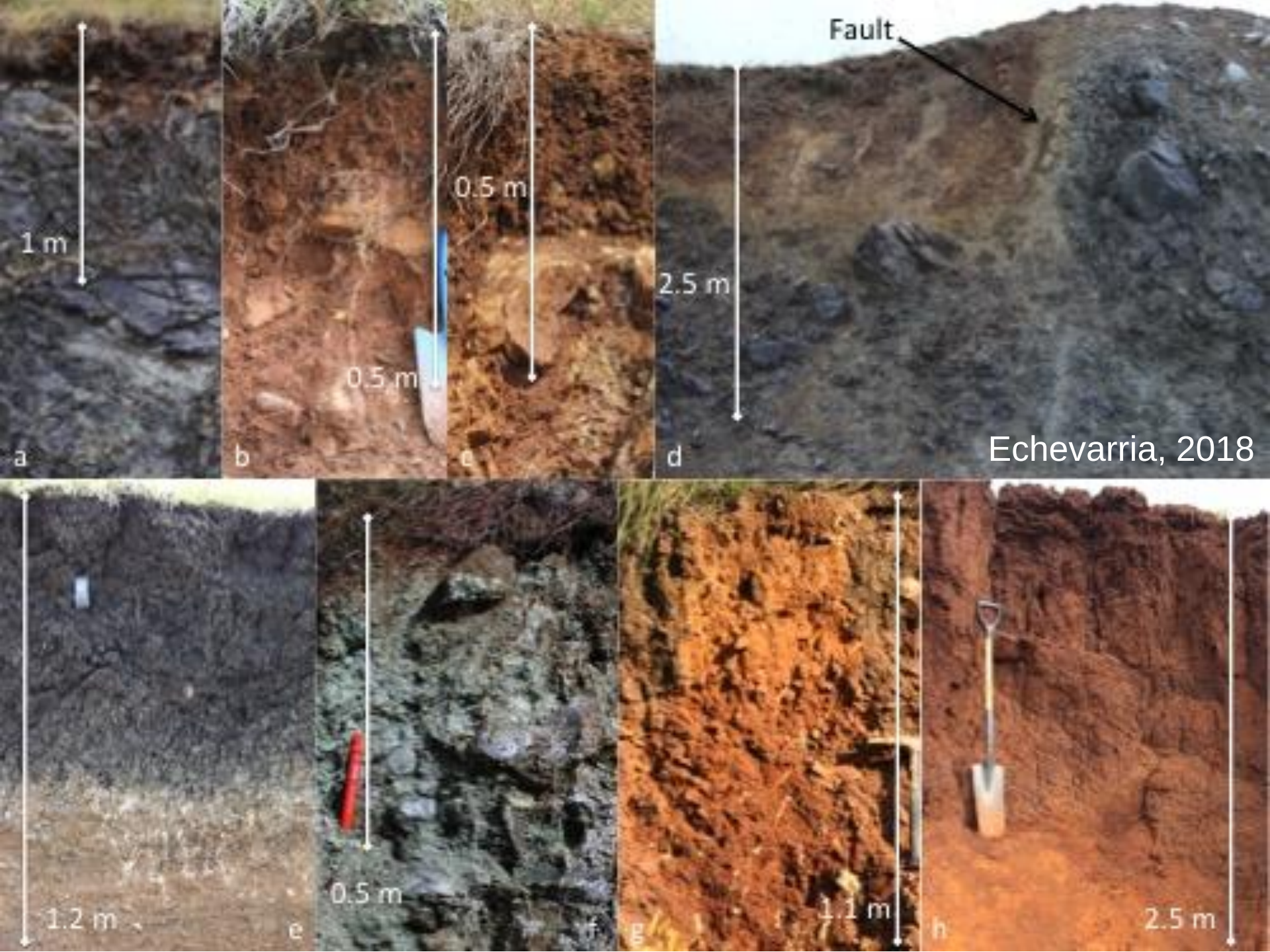
Serpentinite



Leptic Hypereutric Cambisols

Péridotite non serpentinisée

Geric Ferralsol = latérite


Fault
1 m
0.5 m
0.5 m
2.5 m
a
b
c
d
Echevarria, 2018
1.2 m
0.5 m
1.1 m
2.5 m
e
f
g
h

Spéciation des éléments en traces métalliques dans les sols ultramafiques de Sabah

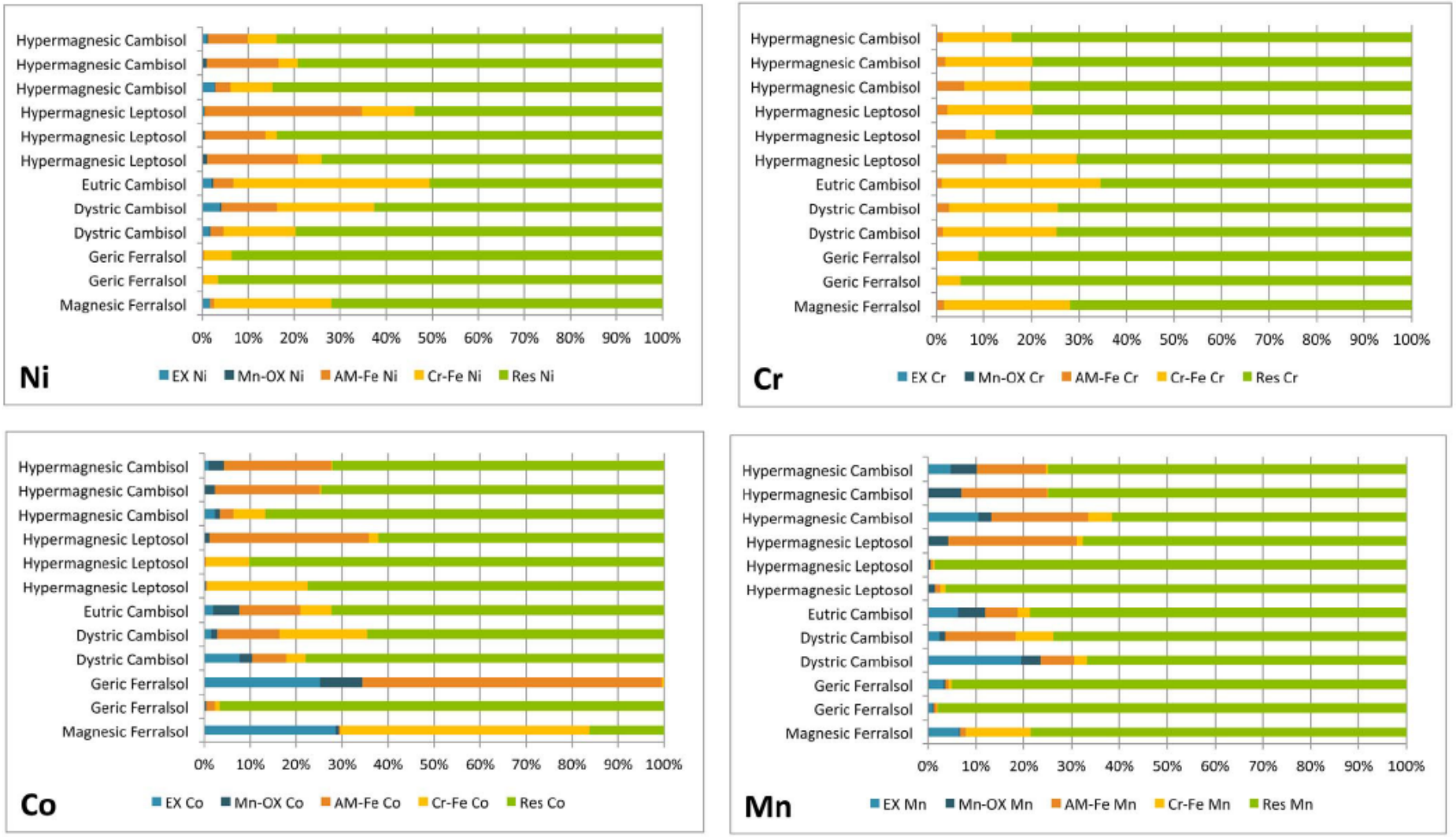
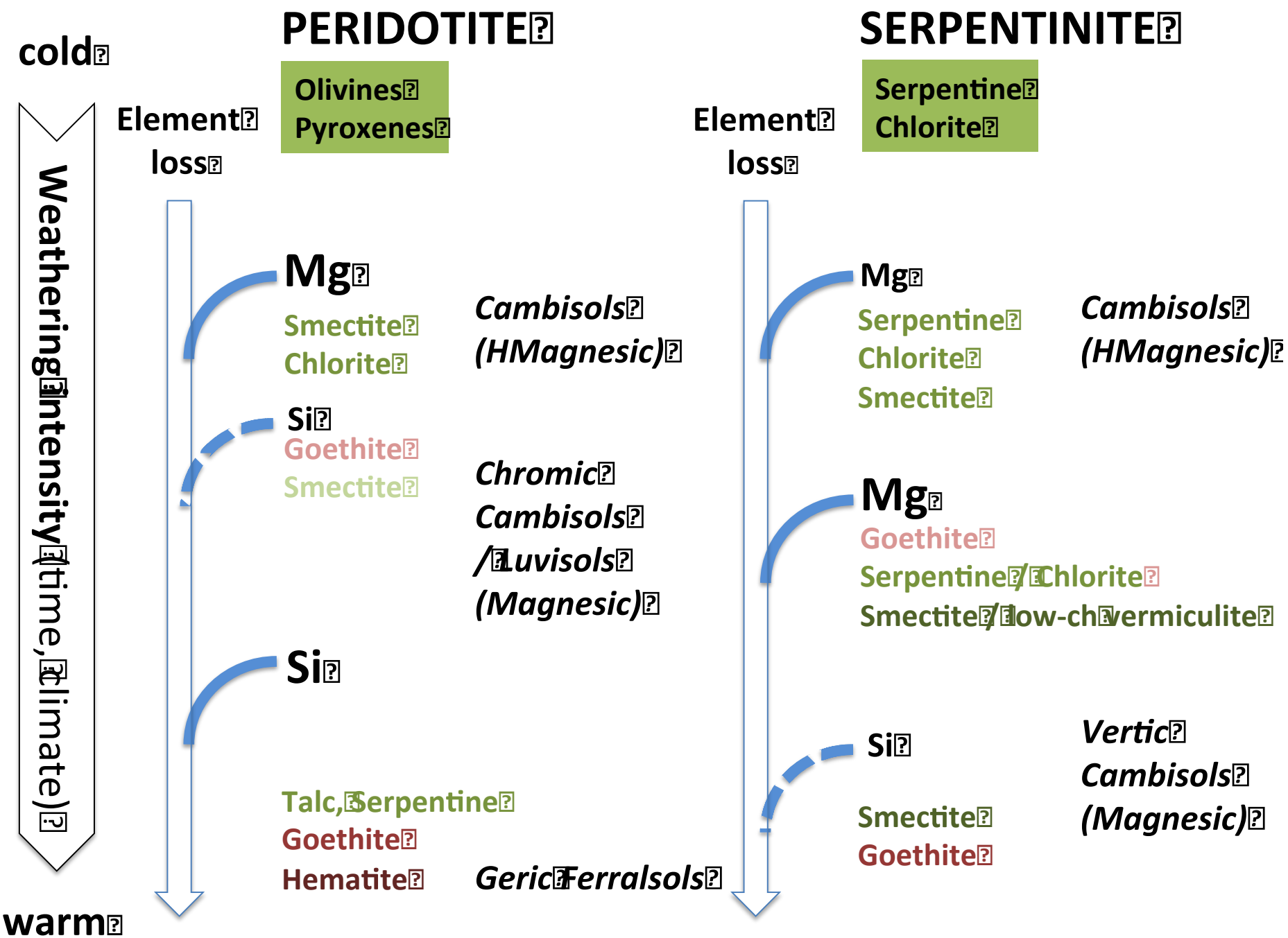


Fig. 4. Partitioning of Ni, Cr, Co and Mn over soil fractions (as percentage of total) of the four main soil types (EX = water soluble and exchangeable, Mn-OX = bound to Mn oxides, AM-Fe = bound to amorphous Fe oxides, CR-Fe, bound to crystalline Fe oxides, Res = residual).


cold
Weathering intensity (time, climate)
warm
PERIDOTITE
Olivines
Pyroxenes
Element loss
Mg
Smectite
Chlorite
Cambisols (HMagnesic)
Si
Goethite
Smectite
Chromic Cambisols / Luvisols (Magnesic)
Si
Talc, Serpentine
Goethite
Hematite
Geric Ferralsols
SERPENTINITE
Serpentine
Chlorite
Element loss
Mg
Serpentine
Chlorite
Smectite
Cambisols (HMagnesic)
Mg
Goethite
Serpentine / Chlorite
Smectite / low-ch vermiculite
Si
Smectite
Goethite
Vertic Cambisols (Magnesic)

Quelles conséquences sur la disponibilité chimique du nickel dans les sols ultramafiques ?

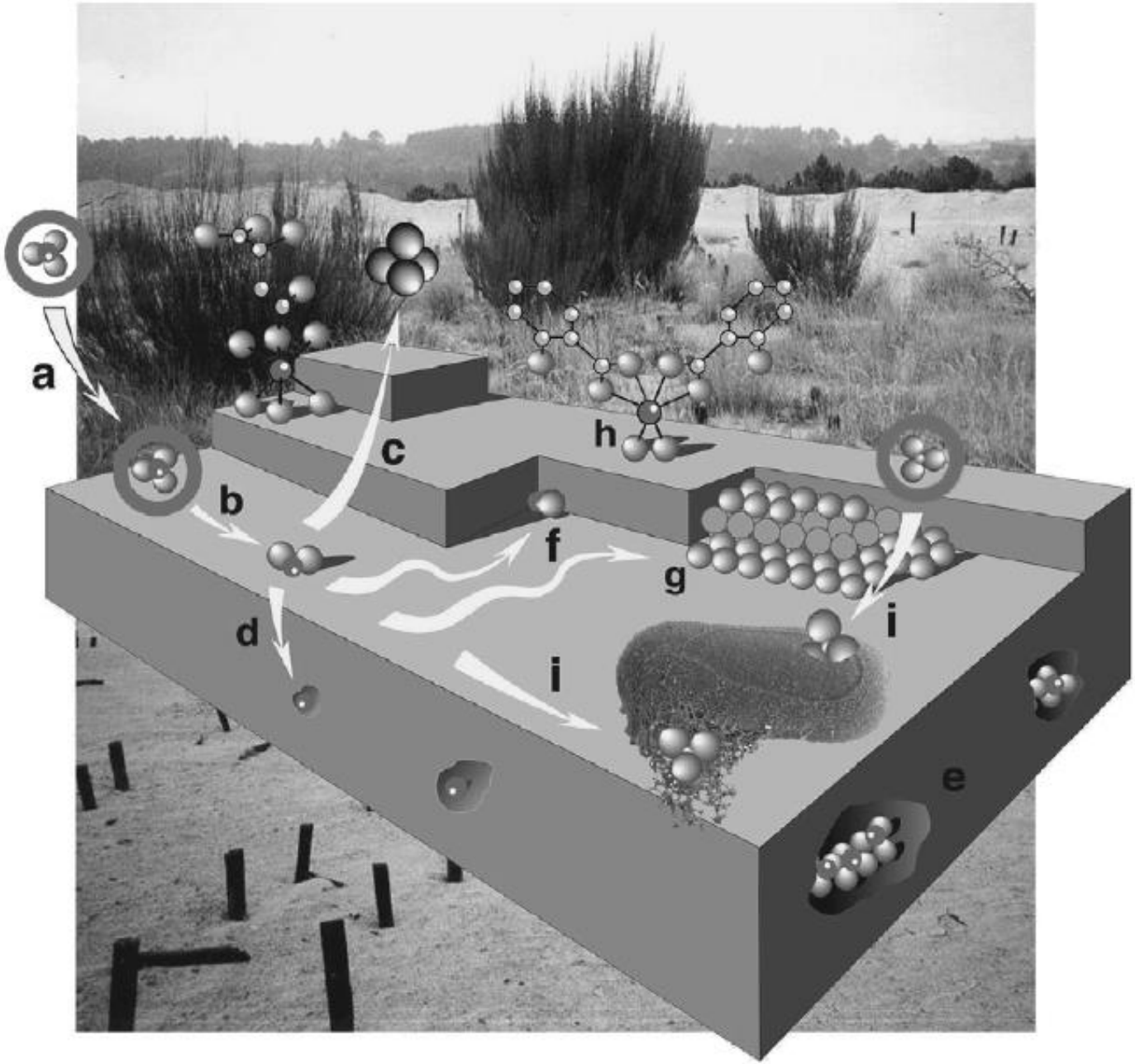
	Cold	temperate	tropical
Olivines	**Hydrous Fe-oxides**	**Goethite**	**Goethite/hematite**
Pyroxenes	**-**		**Smectites/Goethite**
Serpentines	**Serpentines**	**Chlorite Smectites**	**Smectites**

Ni Availability

Principales valences des éléments en traces dans les sols

- **Les métaux de transition à valence stable unique :**
  Cd^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, Tl^{+}, Zn^{2+},…
- **Les métaux de transition à valence variable :**

As(V)/As(III)	**AsO_4^{3-}**
Sb(V)/Sb(III)	**SbO_4^{3-}**
Co(III)/Co(II)	**Co^{3+}, Co^{2+}**
Cr(VI)/Cr(III)	**CrO_4^{2-}, Cr^{3+}**
Hg(II)/Hg(0)	**Hg^{2+}, Hg^{0}**
Mn(IV)/Mn(II)	**MnO_2, Mn^{2+}**
Pb(IV)/Pb(II)	**PbO_2, Pb^{2+}**
Se(VI)/Se(IV)	**SeO_4^{2-}, SeO_3^{2-}**

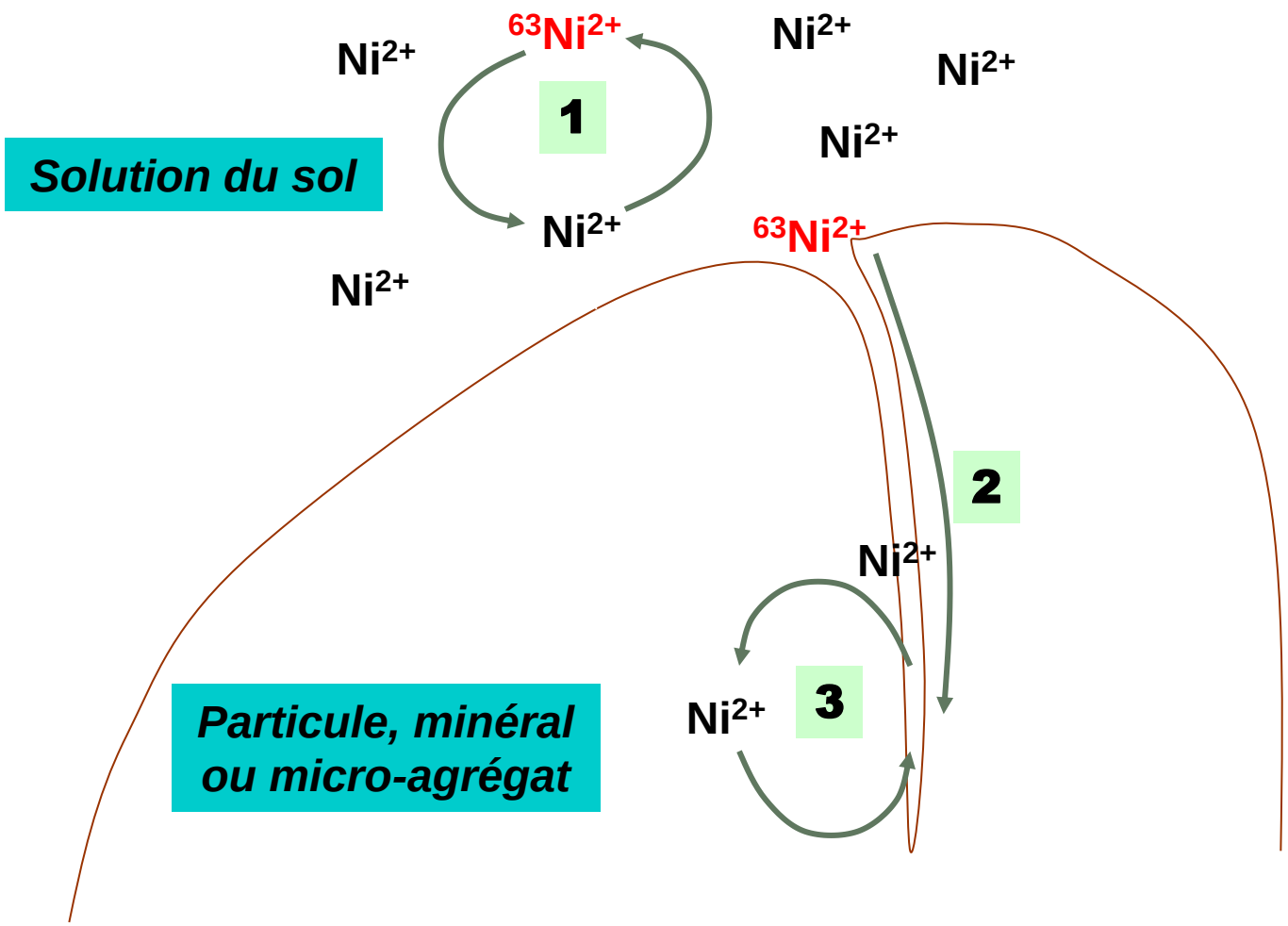

a
b
c
d
e
f
g
h
i
j

Mécanismes de la cinétique d'échange isotopique :

1. Echange de surface (souvent quasi-instantané : t << 1 s)

2. Diffusion Fickienne intra- ou inter-particule ($D_a \approx 10^{-19}$-10^{-20} m^2 s^{-1})

3. Echange de site interne (cinétique limitée par la diffusion)



Des conclusions

- La roche mère, la géomorphologie, l'histoire, le climat et la végétation sont les déterminants de la nature et du fonctionnement du sol
- La variabilité des propriétés des sols est donc à l'image de la variabilité de TOUS ces facteurs : **nécessité de cartographier !**
- Pour certains éléments, c'est la végétation qui entretient leur disponibilité dans les sols (Azote, carbone mais aussi calcium, voire **nickel** !)
- Les conditions thermodynamiques peuvent changer selon les saisons, mais aussi la minéralogie, la disponibilité des éléments
- La biodiversité du sol c'est la clé de la **Biodiversité**

Merci de votre attention !

Echevarria, G. 2018.
Genesis and behaviour of ultramafic soils and consequences for nickel biogeochemistry.

In: van der Ent et al. (eds)
Agromining: Farming for metals
Mineral Resource Reviews,
Springer International Publishing

doi: 10.1007/978-3-319-61899-9_8.