

Chapitre 3: Aspects théoriques sur la pédogenèse (mécanisme de formation des sols)

Il est communément dénommé sols tous les matériaux géologiques rencontrés à la surface de la terre et sur lesquels vivent et se développent tous les êtres vivants organiques faunistiques (dont l'homme) et floristiques. Dans cette optique, on parle de sol rocheux dans le génie civil. On distingue deux grands types de sols :

- les sols autochtones qui se forment sur place et qui n'ont pas été déplacés et
- les sols allochtones qui résultent de l'accumulation de produits provenant d'ailleurs.

3.1. Les sols autochtones :

- forment une mince pellicule (de quelques millimètres à une centaine de mètres {rarement plusieurs centaines} de puissance) ;
- proviennent de la transformation des roches sous les effets de l'altération qui fait intervenir les agents météorologiques agissant par le biais de processus divers physiques, mécaniques, chimiques et telluriques;
- sont constitués de fractions minérales et de fractions de matières organiques.

3.2. Les sols allochtones :

Ils proviennent de la désagrégation suivie de démantèlement puis de transport et dépôt des matériaux géologiques en amont du lieu des observations.

Dans tout ce qui suit, il ne sera quasiment question que des sols autochtones.

Un profil de sol ou un profil pédologique (**Figure 9**) exprime la stratification des faciès successifs de l'évolution des produits d'altération de la roche initiale (dite roche – mère) par les effets consécutifs, conjugués et combinés ainsi que juxtaposés des différents processus d'altération au cours des temps géologiques. Au commencement, la roche – mère aurait affleuré. Elle subissait les actions essentiellement mécaniques des agents météorologiques dont le plus actif est la pluie donc l'eau. Au fur et à mesure que d'autres processus interviennent sur les produits antérieurs de l'altération, l'interface roche saine – sols qu'on définit comme étant le front d'altération avance vers la profondeur. Si les conditions météorologiques sont favorables, l'humus (qui résulte des actions combinées des animaux, des plantes et des bactéries) se développe en surface et crée un contexte favorable à la vie végétale qu'elle soit naturelle ou anthropique

3.3. Les principaux mécanismes de l'altération (**RABENANDRASANA, 2015**)

L'altération est l'ensemble des processus physiques, chimiques et biochimiques qui transforment la roche - mère. La nouvelle roche ainsi formée est le sol. L'altération est une action géologique qui peut se produire dans n'importe quelles conditions sous l'effet de différents agents dont l'air, le vent, le gel – dégel et même l'homme. Mais de loin, le plus important agent d'altération est l'eau sous toute ses formes (gouttes de pluie, ruissellement, infiltration, accumulations diverses dont les glaciers, ...). Un des mécanismes associés à la pédogénie et dû à l'agent d'altération est la libération des ions constituants de la roche mère

soit pour les recombinaison pour former les sols dit néoformés soit pour favoriser leur rétention dans les sols néoformés soit pour les mettre en solution et les emporter (lessivage ionique). Pour ce faire, l'eau met en œuvre deux processus majeurs: l'altération physique et l'altération chimique.

3.4. L'altération physique ou désagrégation mécanique

❖ Processus de l'altération physique:

La **désagrégation mécanique** des roches vient du fait de la fragmentation de la roche – mère qui, à termes, aboutit à sa micronisation. Les principaux facteurs qui interviennent sont :

- les *variations de la température* qui provoquent la dilatation et la contraction des roches dont l'alternance conduit à leur fissuration puis à leur éclatement. La fissuration est d'autant plus importante que si la roche est constituée de différents minéraux n'ayant pas le même coefficient de dilatation. Les microfissures apparaissent alors aux interfaces minérales.

Il s'ensuit la dissociation des fragments de la roche qui est amplifiée par la présence préalable de caractères d'hétérogénéité physique (failles, fractures, schistosité, porosité, plans de stratification, ...);

- le *gel – dégel* : l'eau liquide dans les vides de la roche (fissures et pores) se transforme en glace par le franchissement vers le bas du seuil de 0 °C de la température (gel). Il s'ensuit alors une augmentation de volume de 9 % en moyenne de l'eau. La glace qui croît perpendiculairement aux surfaces des vides augmente ces dernières et la roche devient gélive et elle éclate (cryoclastie ou gélivité). La glace exerce alors une pression disruptive (allant jusqu'à 15 kg / cm²) qui fait éclater la roche en des fragments (gélifragments) dont la forme dépend de la structure de la roche. Le plus souvent les gélifragments sont anguleux ou lamellaires. La glace redevient de l'eau liquide lors du franchissement vers le haut du seuil de 0 °C. La répétition du cycle gel – dégel désagrége la surface des roches sur ses premiers décimètres.

La désagrégation mécanique est particulièrement importante dans les régions

- où la différence des températures diurnes et nocturnes est très élevée (plus de 50 °C dans les climats désertiques);
- où le franchissement du seuil de 0 °C est fréquent;

La désagrégation mécanique des roches est relativement moindre dans les régions à saisons contrastées (cas des climats tropicaux). Elle est responsable de la formation du manteau d'éboulis caractéristiques des zones désertiques et des reliefs positifs (collines et montagnes). Toutefois, et au fil des temps géologiques, la désagrégation mécanique est responsable de la constitution des particules de plus en plus fines qui sont de plus en plus mobiles et s'épanchent sur des surfaces de plus en plus grandes pour favoriser ainsi l'altération chimique.

La désagrégation mécanique est particulièrement efficace sur les roches granitiques et confère à des empilements de boules. Ce type de relief résulte du fait que les granites présentent très souvent un système de fracturation suivant trois directions perpendiculaires qui délimitent ainsi des blocs plus ou moins parallélépipédiques (**Figure 10-a,-b**). Les eaux d'infiltration altèrent ces blocs, surtout au niveau des angles et isolent des boules (**Figure. 10-c**) qui, sous l'effet de

la gravité, ces boules glissent et accélèrent en conséquence l'altération. Elles peuvent également débouler sur les flancs des collines ou montagnes et former des éboulis chaotiques.

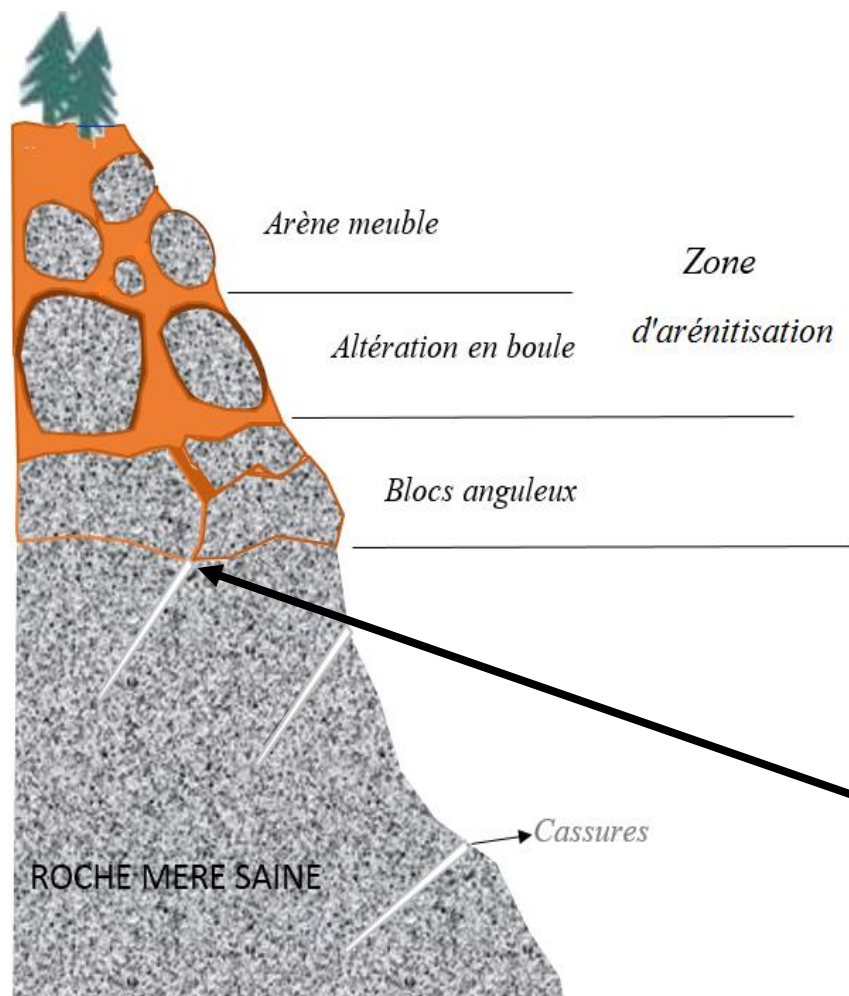


Figure 9: Profil d'altération en climat tempéré.

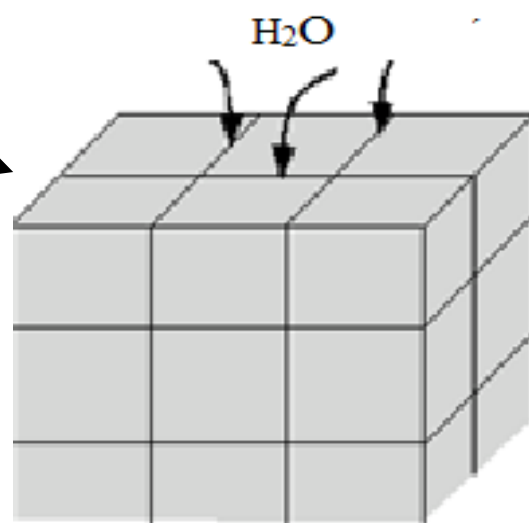


Figure 10- a: Percolation de l'eau dans les fractures
(Documents RABENANDRASANA, 2015)



Figure 10- c: Chaos granitique sous forme de blocs arrondis après lavage par l'eau des détrit.
(Documents RABENANDRASANA, 2015)

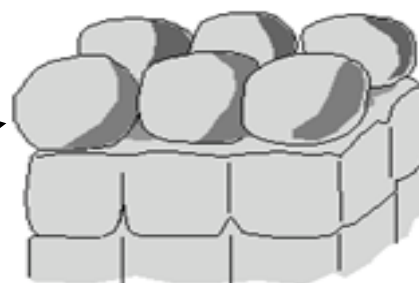


Figure 10- b: Formation des blocs à partir les diaclases.
(Documents RABENANDRASANA, 2015)

Suivant la taille des fragments résultant de la désagrégation mécanique des roches, on obtient trois catégories des éléments détritiques (**tableau 1**) :

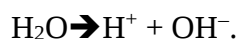
Tableau 1: Classification granulométrique des éléments détritiques. (RABENANDRASANA., 2015)

Nomenclature	Taille des fragments
Rudites	Blocs >20 cm, Cailloux entre 20 et 2 cm, Gravieres entre 2 cm et 2 mm
Arénites	Sables entre 2 mm et 50 µm (0,05 mm)
Lutites	Limon : entre 50 µm (0,05 mm) et 2 µm (0,002 mm), Argiles – Pélites : < 2 µm

3.5. L'altération chimique

L'altération chimique s'opère par le biais de réactions chimiques entre les solutions aqueuses et les minéraux des roches. Elle aboutit à la mise en solution des ions constitutifs des minéraux des roches.

L'eau pure H₂O subit en permanence des dissociations suivant la réaction :



Il en résulte alors la disponibilité des ions H⁺ et OH⁻. La concentration des ions H⁺ détermine le pH (potentiel d'hydrogène) du milieu qui est défini comme étant $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$. A la température normale, il y a 10⁻⁷ moles d'ions hydrogène et autant d'ions de OH⁻ dans un litre d'eau pure. Le pH est donc 7 et est neutre (pH = 7). Le milieu est dit amphotère. L'apport d'ions hydrogène diminue le pH et rend le milieu acide. Cette acidité est apportée notamment par le CO₂ et les acides humiques du sol suivant la réaction suivante :



Le pH est rendu inférieur à 7 et le milieu est basique si le pH > 7.

❖ Le pH des eaux naturelles

Le pH des eaux naturelles ont une grande influence sur la solubilité des ions et sur la précipitation des minéraux. On peut faire une distinction grossière des eaux naturelles en fonction de leur pH (**Tableau 2**) :

Tableau 2: pH des eaux naturelles. (RABENANDRASANA., 2015)

pH	Type d'eaux	pH	Type d'eaux
10	Sols alcalins	4	Tourbières
8,5	Eau de mer	3	Eau de mine
7	Eau de rivière	1	Sources chaudes acides
6	Eau de pluie		

❖ Processus de l'altération chimique

Ce sont surtout les ions de l'hydrogène qui sont responsables de la destruction des réseaux silicatés. Ils déplacent les cations métalliques qui se recombinent avec l'hydroxyle OH^- . Il s'agit donc principalement de l'hydrolyse ou la destruction par l'eau. Ce processus conduit à l'altération de la roche – mère. On parle alors de « l'altération par hydrolyse ».

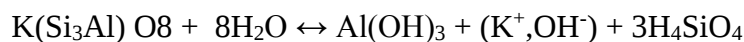
3.5.1. L'altération par hydrolyse

Les molécules sont dipolaires. L'eau en remplissage des vides des roches (pores et fissures) oriente ses pôles négatifs vers les surfaces des réceptacles dont les faces des minéraux permettant ainsi la substitution isomorphique entre les éléments chimiques de l'eau et ceux du milieu cristallin. H^+ remplace des cations des minéraux rendant ainsi libres lesdits cations que l'eau transfère vers d'autres destinations. C'est le mécanisme de lessivage ionique (particulièrement cationique). L'édifice minéral est alors détruit et la charpente silicatée n'est plus stable. La réaction générale de l'hydrolyse est

Minéral primaire + eau $\leftrightarrow$ Minéral secondaire + Solution de lessivage

Le transfert des ions libérés du minéral primaire peut être estompé par d'autres mécanismes géologiques ultérieurs (exemple de la présence d'un front d'oxydo – réduction dont la zone de cimentation qui est un niveau de concentration des minéraux supergènes aux dépens des minéraux hypogènes). Deux types d'hydrolyse sont décrits :

- l'hydrolyse totale qui transforme un minéral primaire en de plus petits composés. Le cas de l'hydrolyse de l'orthose est classique :



Orthose eau gibbsite solution de lessivage

- l'hydrolyse partielle qui est responsable de la formation de l'argile dont la nature diffère en fonction de la disponibilité en eau

- cas de l'hydrolyse partielle de l'orthose dans des conditions d'une faible disponibilité en eau



Orthose eau smectites solution de lessivage

- cas de l'hydrolyse partielle de l'orthose dans des conditions d'une grande disponibilité en eau



Orthose eau kaolinite solution de lessivage

Il est identifié comme réservoir un volume suffisamment grand de la roche – mère tel que les apports et les départs d'éléments chimiques n'affectent pas la composition chimique globale du milieu.

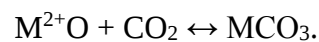
La respiration des êtres organiques augmente d'une manière conséquente les effets de l'hydrolyse en augmentant la quantité de CO_2 disponible et ce, suivant la réaction suivante :



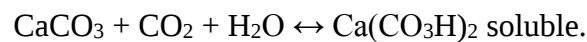
Quoique d'importance moindre par rapport à l'hydrolyse, il existe d'autres processus d'altération chimique : la dissolution, l'hydratation, les réactions d'oxydo - réduction, les carbonatations - décarbonatations interviennent également dans l'altération des roches. Les éléments solubles sont lessivés. Les parties insolubles restent sur place, se recombinent et forment des minéraux de néoformation, principalement des argiles. La température joue un rôle majeur pendant ces processus puisque sous un climat chaud, les réactions peuvent être de 100 fois plus rapides.

3.5.2. L'altération par carbonatation - décarbonatation

La carbonatation est le processus à l'origine de la formation des carbonates par l'intervention du CO₂ dissout dans l'eau. La réaction générique est



La décarbonatation est par contre le processus responsable de la solubilisation des calcaires et des dolomies sous l'action du CO₂ dissout dans l'eau. La réaction générale de la décarbonatation est

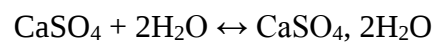


Elle ne concerne que les roches et les minéraux calcaireux.

3.5.3. L'altération par hydratation

L'hydratation consiste en l'incorporation de molécules d'eau à certains minéraux peu ou non hydratés contenus dans la roche comme les oxydes de fer. L'hydratation est accompagnée d'un gonflement du minéral et favorise la destruction de la roche. On a la formation d'hydrates.

Par exemple l'hydratation de l'anhydrite en gypse suivant la réaction

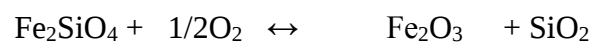
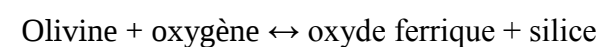


3.5.4. L'altération par dissolution

Ce processus physique simple intéresse les roches salines dont le sel gemme, la potasse et le gypse. Les micro-organismes peuvent intervenir à tous les stades de ce processus. Ils fournissent en particulier des matériaux minéraux ou organiques sources du CO₂, sous forme de carbonates favorisant ainsi la dissolution de certains atomes.

3.5.5. L'altération suivant la réaction d'oxydo- réduction

L'oxydation intéresse le manganèse et surtout le fer qui passe de l'état ferreux à l'état ferrique. Cette réaction est responsable de la couleur rouille des roches riches en fer ou des empreintes ramifiées du manganèse. Les autres métaux des sulfures et des silicates peuvent également être affectés par la réaction d'oxydo - réduction. La réaction classique est celle qui affecte l'olivine :



L'oxydation transforme les sulfures en sulfates. Ces réactions prédisposent les roches aux autres mécanismes de l'altération.

La réaction de réduction est nettement plus rare. Elle peut intervenir dans les milieux hydromorphes et favorise en particulier le passage du fer ferrique au fer ferreux soluble.

3.5.6. *Amplificateur de l'altération chimique*

Les organismes vivants jouent un rôle très important dans le processus d'altération chimique suivant le processus du complexolyse qui est une réaction d'hydrolyse en présence de matière organique.

Globalement, les composés organiques de l'humus extraient les cations métalliques des réseaux cristallins et détruit de ce fait les minéraux. Les cations sont alors fixés sur les composés organiques en donnant des complexes organo - métalliques. Les cations aptes à se lier aux grosses molécules organiques de l'humus sont surtout les ions Al^{3+} , Fe^{2+} et Fe^{3+} . Des études menées sur les effets dus aux organismes vivants adhérant à une roche (algues vertes, diatomées, lichens, champignons, bactéries) ont montré que les organismes vivants adhèrent à la surface grâce à des organes appropriés qui pénètrent dans les fissures et exfolient les minéraux lamellaires (hyphes de lichen exfoliant la biotite). Ils provoquent alors simultanément la désagrégation par micro - division de la surface de la roche combinée à une attaque chimique par l'acide oxalique que les lichens et les racines des végétaux supérieurs sécrètent. Les cations des minéraux sont alors extraits par complexolyse. Sous les lichens se forment des composés mal cristallisés de Si, Al et Fe, de nombreux composés de Ca et des gels organo - minéraux, résultant de la complexolyse et précurseurs de la formation de sol.

Profitant de l'altération physique des roches, les plantes peuvent développer des systèmes racinaires qui contribuent alors à la désagrégation mécanique et ce, par la pénétration des racines dans les fissures. Elles y exercent d'énormes pressions qui écartent les parois. L'altération chimique intervient par la suite avec la décomposition de la matière organique accompagnée ou non de réactions d'oxydo-réduction dues notamment à certaines bactéries.

3.5.7. *Conclusion partielle (Tableau 3, Figure 11)*

Pour conclure cette division relative à l'altération des roches, on retient que :

- l'altération chimique est le processus prépondérant d'altération des roches dans les contextes de climat chaud et humide ;
- parmi les minéraux néoformés par l'altération, il y a prédominance de la fraction argileuse dont l'expression varie en fonction de l'importance de l'altération. Le cortège argileux est donc un marqueur du type d'altération subi par la roche. L'argile est également un excellent marqueur climatique. Il faut toutefois faire la distinction entre l'argile détritique de l'argile formée lors de la diagenèse
- l'altération chimique conduit à une ségrégation au sommet du profil pédologique et surtout à la surface des éléments de comportements voisins en profondeur. C'est le cas du magnésium et du fer, qui dans les phénomènes internes, peuvent se substituer en toutes proportions du fait de leur grande similarité de comportement géochimique. En surface, le magnésium tend à être lessivé en masse tandis – que le fer reste sur place pour constituer des accumulations plus ou moins indurées.

Tableau 3: Produits les plus courants de l'altération chimique.

Constituants solubles	Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , $\text{H}_2\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-
Minéraux résiduels	Quartz, zircon, magnétite, ilménite, rutile, grenat, sphène, tourmaline, monazite
Minéraux néoformés	Kaolinite, montmorillonite, illite, hématite, goethite, gibbsite, boehmite, diaspre, silice amorphe, pyrolusite
Constituants organiques	Acides organiques, acides humiques, kérogène

(Source : [HTTP://WWW2.ULG.AC.BE/GEOLSED/PROCESSUS/PROCESSUS.HTM#ALTÉRATION](http://www2.ulg.ac.be/geolSED/PROCESSUS/PROCESSUS.HTM#ALTÉRATION))

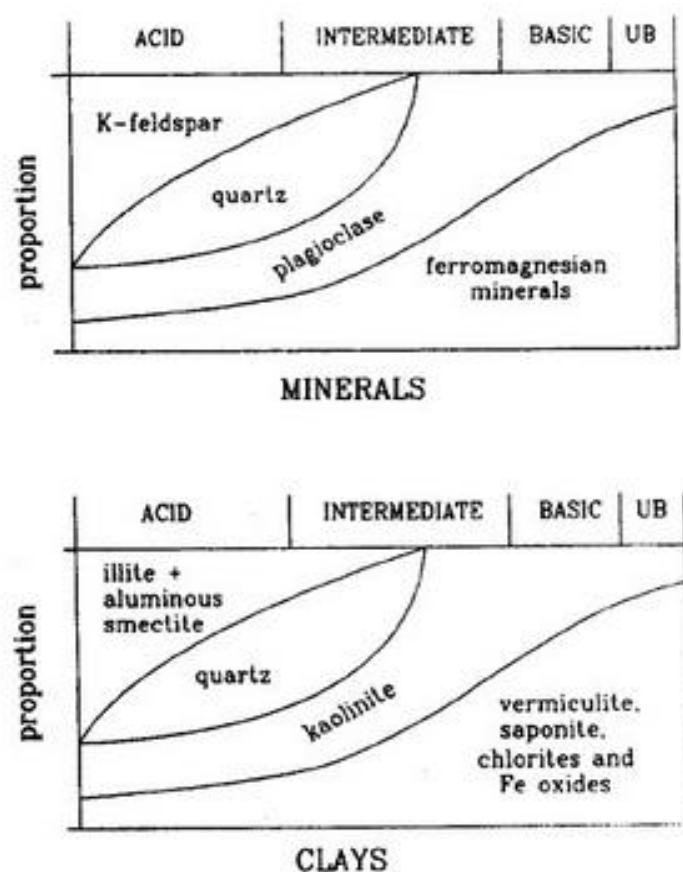


Figure 11: Nature des argiles néoformées en fonction des composants minéraux prépondérants de la roche mère. *Velde, 2008*)

3.6. Les caractères physiques des sols

Indépendamment des caractères généraux permettant d'attribuer les sols à un horizon pédologique donné (voir la division précédente), les sols sont physiquement hétérogènes et

acquièrent des caractères individuels ou de groupe en raison notamment des processus qui les ont façonnés et des caractères mêmes des roches – mères.

3.6.1. Sur le plan de la matière

Les sols sont formés par une phase air (20–30 % du volume), une phase solution du sol (20–30 % du volume), de la matière minérale (45 % du volume) et de la matière organique (5 % du volume). La porosité ainsi que le volume occupé par l'air et la solution du sol permettent aux racines et aux micro-organismes de respirer en même temps qu'ils autorisent de stocker de l'eau. Dans un sol très sec, tous les pores du sol sont remplis d'air. Dans un sol inondé, tous les pores sont saturés d'eau. Dans ce cas, et pour beaucoup de plantes, les racines ne peuvent plus respirer, et ceci peut leur être fatal.

- La matière minérale dans le sol fournit un support aux racines. Elle libère lentement les sels minéraux qui sont les nutriments pour les plantes. La matière minérale peut être composée d'éléments de tailles très différentes. On distingue (voir **le tableau 1 en page 18**):
 - les sables grossiers et les petits cailloux ;
 - les sables fins ;
 - le limon ;
 - l'argile.
- Les sols ne contiennent qu'une petite proportion de matière organique qui, contradictoirement, et quand elle est présente, joue des rôles cruciales dans l'altération des roches en favorisant la libération des sels minéraux et d'autres nutriments dans la solution du sol et augmente ainsi la disponibilité de l'eau.

3.6.2. La coloration des sols

La couleur est le caractère des sols observé en premier. Une forte néoformation (allant jusqu'à 25 % en volume)

- de la goethite ($\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$) confère à une couleur jaune des sols néoformés ;
- de l'hématite ($\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$) confère à une couleur rouge des sols néoformés ;
- de pyrolusite (MnO_2) confère à une couleur noire foncée des sols néoformés ;
- des produits de décomposition organique et plus particulièrement l'humus colorent les sols en brun à noir.

En surface, la matière organique en décomposition (quand elle est présente) colore les sols en brun à noir.

Dans la partie supérieure du profil pédologique, la coloration des sols est conditionnée par la nature et la proportion relative du minéral néoformé. Plus en profondeur, la coloration des sols est celle de l'argile néoformée qui commence par un horizon bariolé.

3.6.3. La texture du sol

La texture peut se définir comme étant l'organisation générale du sol. Elle est conditionnée par les colloïdes : argiles, substances humiques et hydroxydes. Les argiles favorisent la fragmentation du sol en produisant des fentes de retrait lors de la dessiccation. Elles peuvent enrober les autres particules et colmater les pores et les fissures. Elles peuvent fixer des composés organiques par adsorption sur leurs feuillets par l'intermédiaire des oxyhydroxydes

d'Al et de Fer qui forment un revêtement pelliculaire. Ces complexes organo-minéraux (ou argilo-humiques) sont agglomérés en agrégats incorporant des filaments mycéliens et des bactéries à polysaccharides.

On distingue généralement 3 grands types de textures :

- particulaire : sol très meuble ;
- massive : les constituants sont liés par un ciment ;
- fragmentaire en agrégat (mm), grumeaux (cm) ou polyédrique. Cette texture est très favorable aux cultures.

La répartition des proportions relatives de sable, de limon et d'argile détermine la texture du sol (**figure 12**). La texture du sol donne donc une indication du pourcentage de présence de chacune des particules qui le constituent (sable (sand) > 50 µm ; 50 µm > limon (silt) > 2 µm ; argile < 2 µm). Par exemple, le sable constitue le sol sableux à plus de 90 % et les 10 % restants sont d'un mélange d'argile et de limon.

La texture est très importante parce qu'elle conditionne en grande partie le mouvement de l'eau dans le sol. En général, la percolation (mouvement vertical descendant) de l'eau dans un sol sableux est beaucoup plus grande que dans un sol argileux. Le sable est toutefois chimiquement inerte et ne retient donc pas les éléments chimiques qui le traversent. L'argile qui est un phyllosilicate est constituée par la stratification de feuillets qui sont eux – mêmes formés chacun par une ou deux couches octaédriques de cations encadrées par des couches tétraédriques de silicate ($(\text{SiO}_4)^{2-}$) tel que deux feuillets sont liés entre eux par des anions interfoliaires (essentiellement OH^-). On définit par capacité d'échange cationique (CEC) le nombre de moles de cations qui compenserait un déficit permanent de charge négative. La CEC indique donc l'aptitude d'une argile à « piéger » des cations.

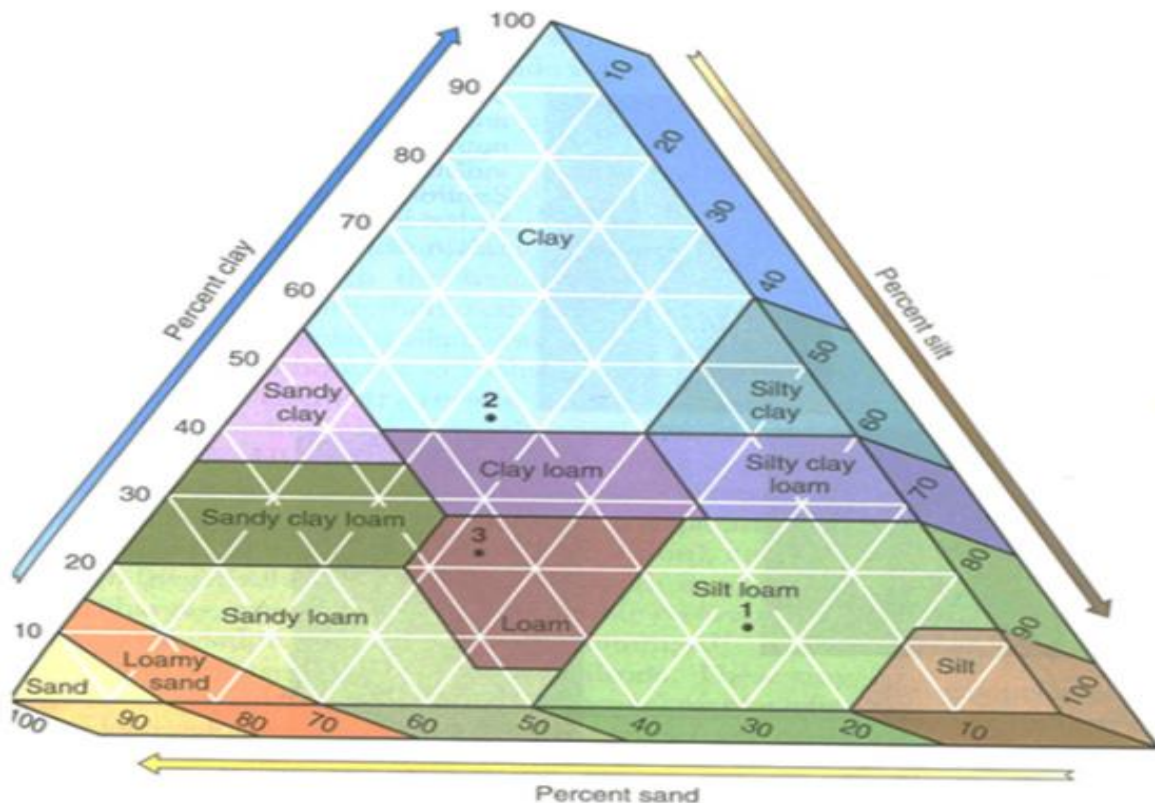


Figure 12: Diagramme des textures des sols. *Christopherson et al. (2009) in Benazzouz (2011)*

À l'état sec, un sol argileux est compacté du fait de l'évacuation de ce que contenaient les pores. Il prend une configuration en blocs prismatiques durs séparés par des fissures. Les sols sablo-limoneux ont une proportion conséquente de particules fines (limon et argile) qui enrobent les particules grossières (sable). Ce type de sol se débite facilement en mottes.

3.6.5. Profil pédologique

Le profil pédologique ou profil des sols indique la stratification des matériaux résultant des effets consécutifs, conjugués et juxtaposés de chacun des processus d'altération ayant affecté la roche mère puis, d'une manière juxtaposée et répétitive, chacun des faciès dérivés. Chaque strate exprime l'intensité d'exposition à chacun des processus et définit le faciès du sol. Un ensemble de faciès, quoiqu'évolutifs vers le haut, façonnés à des intensités similaires par le même agent d'altération, progresse vers le bas et limite conséquemment un horizon pédologique.

Les profils pédologiques des **figures 13, 14** montrent la stratification des différents horizons. Du bas vers le haut, le profil pédologique est :

- l'**horizon R** de la **roche – mère** qui est saine et ne présente aucune marque d'attaque par l'agent d'altération. Son toit est donc le front d'altération ou le front pédogénétique. Le lessivage ionique ne s'y était pas déroulé ;
- l'**horizon C** ou la **saprolite (saprolithe)**. C'est horizon de passage de la roche saine à la roche intensément altérée :
 - à sa base, on rencontre encore la roche – mère qui a subi la désagrégation mécanique (roche fissurée ou saprock). Moins de 20 % des minéraux vulnérables aux attaques de l'agent météorique y sont altérés. La texture et la structure de la roche y sont intégralement préservées. Un très faible lessivage s'y passerait en libérant les ions des minéraux altérés ;
 - la roche fissurée est surmontée de la saprolite grossière autrement dénommée altérite ou gore (arène si la roche mère est de nature granitique). La désagrégation mécanique s'intensifie ainsi – que l'hydrolyse des minéraux les plus vulnérables comme les feldspaths. Plus de 20 % des minéraux vulnérables aux attaques de l'agent météorique y sont altérés. La roche – mère y est aisément identifiable quoique son altération soit relativement poussée. Sa texture et sa structure sont intégralement préservées. Elle se présente en des fragments et blocs de grande taille (pluri-décimétriques à métriques). Les minéraux primaires non altérés peuvent facilement se détacher. Le lessivage s'intensifie et est accompagné de pseudomorphose ou paramorphose des minéraux altérés générant ainsi des boxworks (cavités laissées par les minéraux hydrolysés et, à termes, dissouts). L'argile n'y apparaît qu'en de très faibles proportions et occupe généralement les boxworks qui lui a alors servi de cristallisoire ;
 - La saprolite grossière est surmontée de la saprolite fine ou lithomarge (arène déstructurée si la roche-mère est de nature granitique). L'hydrolyse est intense et l'eau fracture aisément l'édifice rocheux préalablement fragilisé par l'étape précédent de l'altération. La structure et la texture y sont préservées et disparaissent progressivement en remontant le profil. La roche – mère évolue vers l'état reliquaire et s'y trouve en des fragments et blocs dont le diamètre est

de plus en plus petit vers le haut du profil. L'hydrolyse concerne quasiment tous les minéraux dont l'affectation est dans le sens inverse de l'ordre de cristallisation selon le modèle de Bowen. L'argilisation s'intensifie. Le toit de la saprolite fine marque la fin de l'horizon de la saprolite;

- l'**horizon B** : horizon d'accumulation autrement dénommé **latérite de transition**. Cet horizon est la base de la pédolite (pédolithe) où la roche – mère est en cours de disparition au profit des sols. L'hydrolyse y est intense et est du type partiel à faible disponibilité d'eau pour favoriser la formation de l'argile. Le fer y est encore à l'état ferreux (Fe^{2+}) conférant à une coloration verte ou bleue. Si la roche mère ne permet pas la présence de Fe^{2+} ou que ce dernier ait été évacué, le sol tend vers une coloration dans les tons du blanc. La structure et la texture de la roche – mère ont complètement disparu.
- L'**horizon A** : la **latérite**. La roche – mère a complètement disparu et a fait place au sol qui est dans une très large part, formé de minéraux d'argile qui sont, généralement, des smectites à la base pour devenir du kaolin vers le haut. Le kaolin est une argile plus mature ($\text{CEC} = 0$) qui ne permet pas la « capture » des cations ferriques dans les feuillets mais les laissant libres favorisant ainsi l'individualisation de la limonite (amas d'hydroxydes de fer), goethite [$\text{FeO}(\text{OH})$] et son polymorphe lépidocrocite, d'hydroxyde d'aluminium (gibbsite [$\text{Al}(\text{OH})_3$]) et d'oxydes de fer (hématite [Fe_2O_3]). La couleur de la latérite est conditionnée par l'expression du fer qui est stable plutôt à l'état ferrique. A la base, le fer ferrique est largement exprimé par la goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$) qui confère au sol une couleur jaune. Due à l'intensification de l'hydrolyse au fil des temps géologiques, la goethite fait place à l'hématite (Fe_2O_3) qui lui confère la couleur rouge. Un aspect tacheté est dû à la nodulisation (accumulation ferrugineuse par densification du plasma). Au haut de l'horizon, la goethite peut se concentrer et acquérir une induration progressive. Au fil des temps géologiques, donc de l'exposition aux eaux météoriques, la concentration ferrugineuse évolue de la croûte, carapace, puis cuirasse. L'horizon A est subdivisé en

- A1 (sus-jacent) à matière organique et, malgré la pauvreté en nutriments, ce sous-horizon favorise généralement une couverture forestière ;
- A2 (sous-jacent) sans matière organique.

Si la roche – mère est alumineuse car elle est granitique ou syénitique, il se forme plutôt de l'hydroxyde d'aluminium et

- la nodulisation résulte de l'accumulation de l'aluminium par densification du plasma, donc de l'aspect tacheté de la latérite ;
- l'hydroxyde qui est le principal constituant minéral de la couche indurée superficielle est la gibbsite et non la goethite et il se forme de la bauxite.

Due à la couverture forestière au haut du sous-horizon A1, une litière organique O peut se constituer avec les différents sous – sous - horizons suivants :

- *OL - litière fraîche* : accumulation de débris bruts (feuilles mortes, branchage, fleurs et fruits, cadavres d'animaux) qui juchent le sol et en cours de décomposition ;
- *OF - horizon de fragmentation* (dénommé, à tort, horizon de fermentation) : La température et l'humidité y sont optimales, en raison de l'isolation fournie par la litière fraîche. On y observe aussi de nombreuses racines fines en croissance et

en symbiose avec les champignons (mycorhize). C'est l'horizon où l'activité biologique est optimale ;

- **OH - horizon d'humification** : horizon largement constitué par de la matière organique morte et faisant objet des activités des micro-organismes du sol. La défection animale y donne de nombreuses boulettes noires ou brunes foncées responsables de la couleur sombre de ce sous – sous – horizon. La défection a été responsable de l'injection de carbone vers les racines vivantes et mortes (rhizodéposition).

Tout au long du profil pédologique, des horizons minéraux sont individualisables. Ils sont soit les moins riches soit démunis en organismes vivants. Ce sont :

- **horizon de lessivage (E)** : Il correspond à la latérite. Il est drainé par les eaux d'infiltration qui transportent les composés solubles et les particules colloïdales ainsi que par le lixiviat (liquide produit par la dissolution de la matière organique auquel viennent se mélanger des éléments chimiques comme les métaux et les radionucléides). Ce mécanisme explique pourquoi la latérite est pauvre en ions et en hydroxydes de fer et d'aluminium ;
- **horizon d'accumulation (B)** : il correspond à l'horizon de transition. Il est riche en éléments fins (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium, composés humiques). Il estompe l'infiltration en raison d'obstacle mécanique tel que la finesse de la porosité ou en raison de la modification de l'équilibre électrostatique ou du pH ;
- **horizon d'altération (S)** : il correspond à l'horizon de la saprolite. Il est le siège de processus physico-chimiques et biochimiques aboutissant à la destruction mécanique et chimique de la roche - mère.
- **roche-mère peu altérée (C)**
- **roche-mère non altérée (R)**

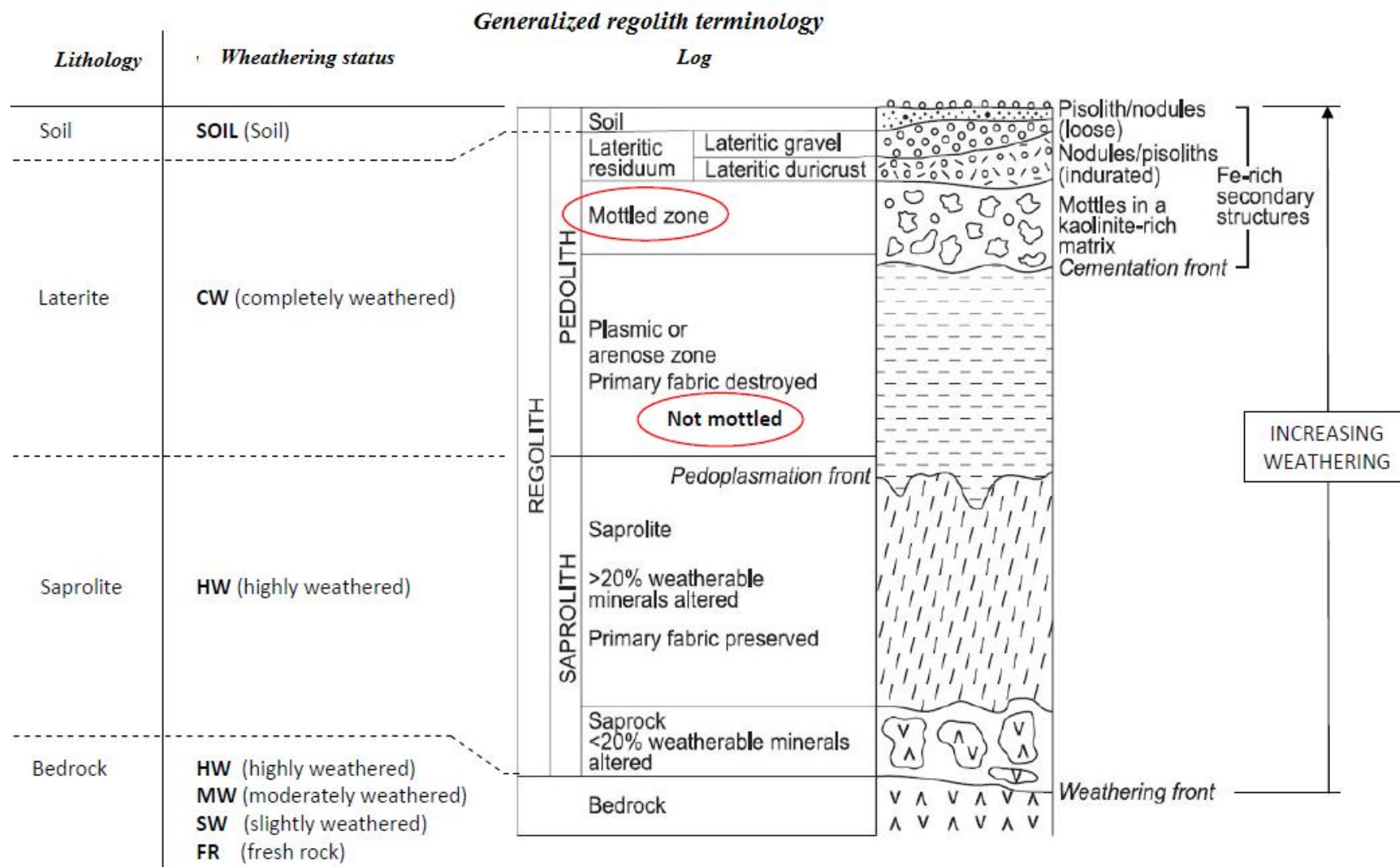


Figure 13: Profil pédologique général. (Outil chez TREM)

PROFILS PEDOLOGIQUES

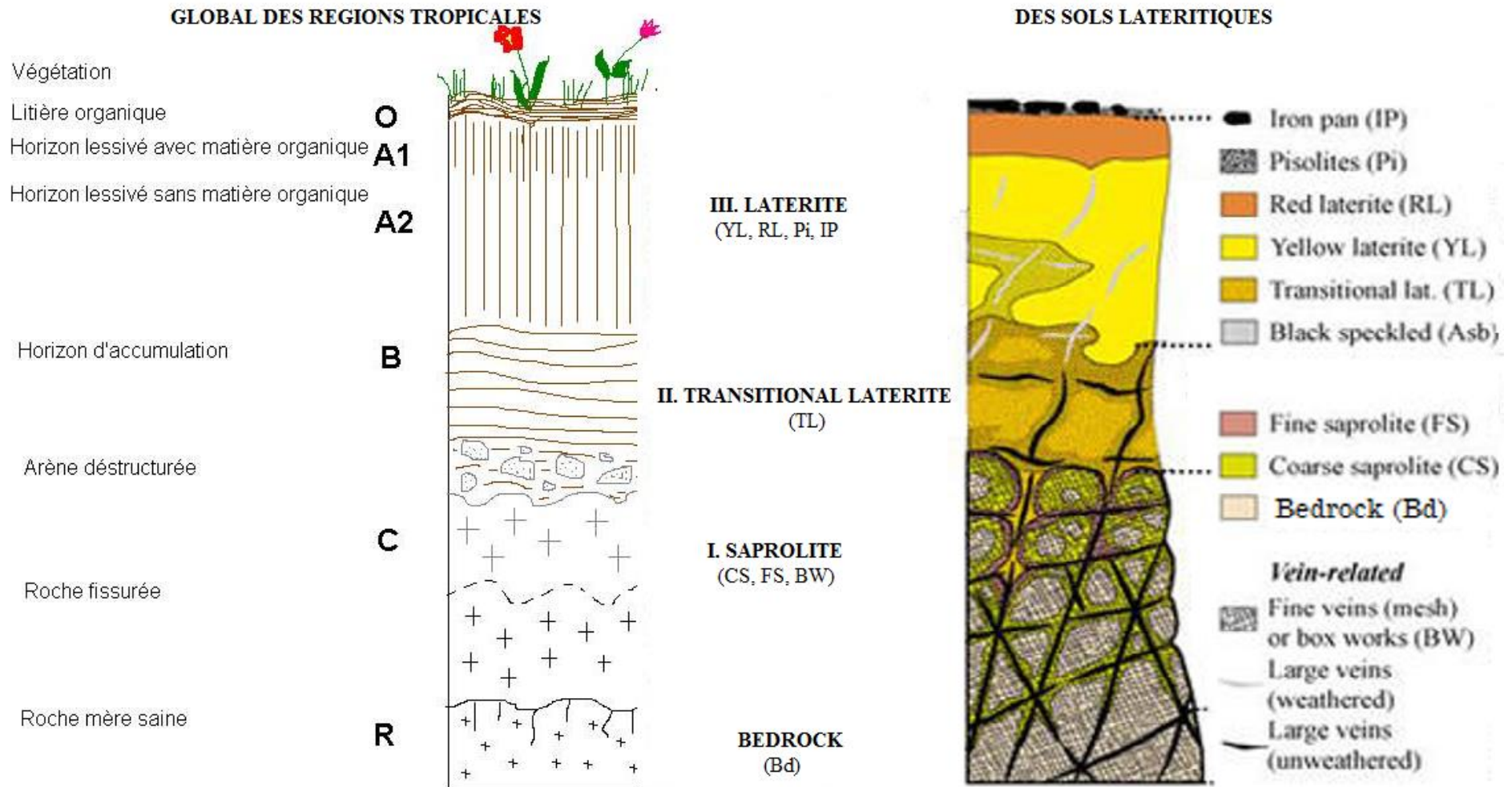


Figure 14: Profil pédologique général des pays tropicaux (comme Madagascar)