

5ème version (août 2006)

CHAPITRE VI :

TYPOLOGIE DES SOLS :

Le REFERENTIEL PEDOLOGIQUE FRANCAIS

Le but de ce chapitre n'est pas de faire de vous des spécialistes de la nomenclature des horizons ou des sols : ceci serait d'ailleurs un objectif impossible à réaliser en aussi peu de temps et n'aurait pas vraiment d'utilité dans votre vie professionnelle.

Aussi l'objectif n'est pas de vous abreuver de théorie et de connaissances, de vous faire apprendre quantité de notions qui n'auraient pas d'utilité pour vous, mais de vous donner les bases pour apprendre à apprendre. Par contre, les objectifs principaux de ce cours sont :

- être capable d'expliquer (donc **connaître**) les processus généraux intervenant dans la pédogenèse (formation des sols) : migrations d'éléments, phénomènes d'oxydo-réduction,...
- être capable de **décrire** correctement un sol sur le terrain (description chimique et physique, identification grossière des horizons)
- être capable d'**identifier** (sur le terrain ou à l'aide de documents) ou du moins, **situer dans une typologie**, les principaux types de sols en justifiant votre choix.
- être capable d'**expliquer** le fonctionnement d'un sol (processus pédogénétiques), dégager ses propriétés (facteurs physiques et chimiques limitants,...), **en déduire ses potentialités forestières afin de prendre des décisions compatibles avec une gestion durable des sols**.

DECRIRE et SITUER UN SOL DANS UNE TYPOLOGIE, EXPLIQUER SON FONCTIONNEMENT et en DEDUIRE SES POTENTIALITES FORESTIERES en vue d'une GESTION DURABLE sont en fait les objectifs de votre formation en pédologie forestière.

Bon travail !

J-Y MASSENET

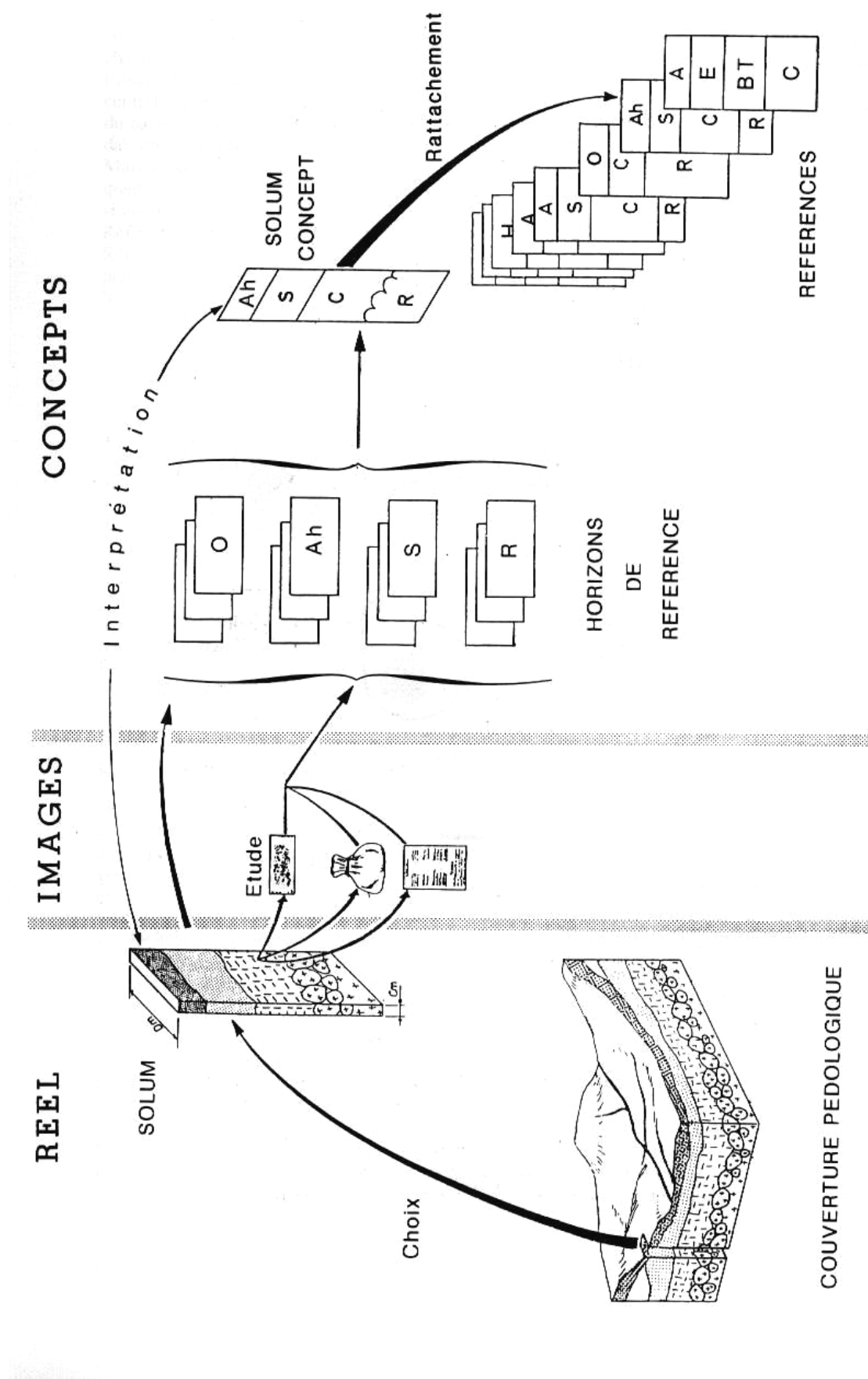


Figure 1 : Principe du Référentiel Pédologique Français (schéma tiré du R.P.F , 1995)

1ère PARTIE : GENERALITES

I. Le sol : un milieu organisé

Le sol, à première vue, apparaît comme un milieu continu : on parle de **couverture pédologique**. Cependant, si l'on y regarde de plus près, il s'agit d'un milieu possédant une certaine organisation : nous en distinguerons trois.

1. Nous avons vu dans les chapitres précédent que les constituants minéraux et organiques du sol ne sont pas disposés les uns par rapport aux autres d'une manière quelconque. Au contraire, les constituants du sol sont organisés les uns par rapport aux autres afin de former des **organisations élémentaires (agrégats, concrétions, vides,...)**, premier niveau d'organisation d'un sol..
2. D'autre part, on peut distinguer dans un sol différentes couches plutôt horizontales. Ces couches sont structurellement homogènes et sont séparées entre elles par des limites plus ou moins nettes. Ces différentes couches, formées chacune d'un assemblage d'organisations élémentaires forment le deuxième niveau d'organisation du sol : **l'horizon**. Chaque horizon est un volume caractérisé par son contenu (agrégats, vides, concrétions,... = organisations élémentaires) et son contenant (limites, épaisseur).
3. Enfin, plusieurs horizons peuvent être associés et ordonnés dans les trois dimensions de l'espace pour former des **systèmes pédologiques**, troisième niveau d'organisation de la couverture pédologique.

II. Principes du référentiel pédologique

Ce référentiel a été élaboré par un groupe de travail dans le cadre de l'A.F.E.S. (Association française pour l'étude du sol) et est paru en 1992 (pour la première édition, la seconde édition étant parue en 1995).

Il est destiné à remplacer le système français de classification des sols qui avait été élaboré en 1967 par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (C.P.C.S.).

Le **RPF n'est pas une classification hiérarchisée** mais une typologie des sols permettant de rattacher un sol réel (décrit sur le terrain) à une des **Références** (voir schéma de la figure 1 ci-contre) proposées .

La démarche de rattachement comporte trois grandes étapes :

- la description du sol réel :

Il s'agira tout d'abord de décrire le sol réel au moyen d'un solum : **le solum est une tranche verticale d'une couverture pédologique observable dans une fosse ou une tranchée.**

Les descriptions (effectuées au niveau de chaque horizon) concerneront la structure, la texture, les couleurs, la profondeur prospectée par les racines et leur distribution dans le solum, le PH , la présence de calcaire actif,...

Des études complémentaires en laboratoire (PH, CEC, S/T, granulométrie,...) viendront compléter les observations faites sur le terrain.

- l'interprétation des observations et l'identification des horizons :

En fonction des données récoltées sur le terrain et des résultats des analyses complémentaires éventuelles, le pédologue va essayer de raccrocher chaque horizon réel avec un **horizon de référence**.

Chaque horizon de référence proposé par le RPF (il y en a 73 dans l'édition 1995) est défini et décrit par plusieurs éléments tels que :

- ♠ caractères morphologiques (structure, couleurs,...) ,
- ♠ données analytiques (PH, S/T, CEC,...)
- ♠ position dans la couverture pédologique.

- le rattachement du sol réel à une ou plusieurs références :

Le rattachement consiste à relier un solum à une ou plusieurs Références (caractérisées par des **solums-diagnostiques c'est à dire des successions verticales d'horizons de référence**) puis à lui donner le(s) nom(s) correspondant. Cela se fait sur base d'un raisonnement pédologique sur base de l'interprétation des données de terrain et plus précisément sur base de profils.

Le profil étant une séquence d'informations (données) concernant le solum, ordonnée de haut en bas. Ces informations peuvent être relatives à des caractères visuels (profil structural par exemple) ou à d'autres caractères (profil hydrique, profil granulométrique,...).

A noter également, que les Références (au nombre de 102 dans l'édition de 1995) peuvent être subdivisées en **Types** par l'adjonction d'un ou plusieurs **qualificatifs** (voir plus loin).

III. Les principales étapes de la différenciation des horizons : rappels

Au cours de l'histoire de la formation et du développement d'une couverture pédologique, les horizons prennent naissance, les uns après les autres ou conjointement, selon un ordre chronologique qui n'est pas quelconque.

PREMIERE ETAPE : Accumulation de matière organique et altération de la roche-mère.

Deux types d'horizons prennent progressivement naissance :

- en surface, des **horizons organiques O** et/ ou **des horizons organo-minéraux (ou hémiorganiques) A**. Dans ces derniers, se déroulent des processus d'altération des minéraux, d'accumulation et d'incorporation de matière organique (favorisé par l'activité biologique), de migration d'éléments, ainsi que des phénomènes d'agrégation (formation d'agrégats).
- en profondeur, des **horizons d'altération C** (roche-mère pédologique) provenant de la fragmentation de la roche-mère en place. On y observe une certaine altération chimique de la roche (départ des éléments les plus solubles,...) et de ces minéraux (minéraux primaires). .

DEUXIEME ETAPE : Altération des minéraux primaires et approfondissement du solum.

Les mécanismes d'altération des minéraux s'accroissant, un nouvel horizon prend naissance entre les horizons A et C : il s'agit de l'**horizon S (structural)**. Cet horizon S diffère de l'horizon A car il est nettement plus pauvre en matières organiques et il ne présente pas de structuration d'origine biologique (les structures fragmentaires seront généralement anguleuses et non arrondies).

Il peut y avoir, au sein de l'horizon S, des redistributions (migrations) internes de matières (CaCO_3 , argile), mais il ne s'agit **pas d'accumulations illuviales** (c'est à dire provenant des horizons supérieurs).

A partir des produits de l'altération des **minéraux primaires** (composant la roche en place), il y a formation de nouveaux minéraux généralement phylliteux (argiles). Ces nouveaux minéraux sont appelés **minéraux secondaires**.

TROISIEME ETAPE : Altération , approfondissement du sol, migrations d'éléments entre les horizons, genèse de minéraux secondaires.

Les mécanismes d'hydrolyse, de lixiviation, d'entraînement particulaire (argiles fines surtout), de genèse de minéraux secondaires (argiles d'héritage, de transformation , ou de néoformation : voir cours de géologie), s'accroissent au sein des horizons A, S, et C : cela concerne principalement les constituants relativement peu solubles (silicates et hydroxydes). Il en résulte la naissance et le développement de deux types d'horizons :

- des **horizons éluviaux E** (anciens A2, CPCS) : ce sont des horizons appauvris en particules fines de taille $< 2 \mu\text{m}$; ces appauvrissements argileux sont toujours précédés d'appauvrissements en éléments solubles (chlorures, sulfates, carbonates,...) ; ils sont souvent accompagnés d'appauvrissement en hydroxydes (Fe, Al). Ces horizons sont généralement situés immédiatement au-dessous d'un horizon A et sont beaucoup moins riches en carbone que ce dernier.
- des **horizons illuviaux B** : ce sont des horizons enrichis en particules argileuses . Mais il peut s'agir, selon les cas, d'accumulations d'hydroxydes (Fe, Al) , et/ou de matières organiques, et/ou de silice, et/ou de calcaire, et/ou de gypse, et/ou de sels solubles.

L'accumulation d'un constituant peut avoir trois origines :

1. **accumulation absolue après migration** à partir d'un horizon situé au-dessus*, ou à l'amont, voire, pour les sels très solubles (Na), au dessous.
2. **accumulation absolue par altération** des constituants : par exemple, accumulation de particules et de minéraux argileux par altération de micas, feldspaths,...issus de la fragmentation de la roche-mère.
3. **accumulation relative** par départ des autres constituants plus solubles ou plus facilement entraînés : c'est ainsi que se forment, par exemple, certains horizons d'accumulation d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'aluminium.

*Contrairement à ce qui se passe dans un horizon B, il n'y a pratiquement pas , dans un horizon S, d'accumulation illuviales.

Au terme de cette troisième étape, l'évolution de la couverture pédologique est très marquée, les horizons sont très **différenciés** : on parlera alors de « **sols évolués** » pour désigner les sols de type A / S / C ou A / E / B / C et de sols « **peu évolués** » pour les sols de type A/C.

Une couverture pédologique très différenciée est plus évoluée qu'une couverture peu différenciée, mais ceci ne signifie pas qu'elle est plus vieille. La vitesse d'évolution d'une couverture pédologique, et la différenciation maximum qu'elle peut atteindre, sont fonctions de facteurs comme : le climat, la végétation, la pente (les sols en pente forte peuvent être continuellement rajeunis par l'érosion), l'homme,... . Humidité, chaleur, acidité et perméabilité des roches facilitent une différenciation rapide, tandis que aridité, faible porosité des roches, richesse en calcaire du milieu, pente forte, ralentissent la différenciation.

IV. Les principaux horizons de référence

Nous nous bornerons ici à donner les caractéristiques les plus importantes des principaux horizons de référence. Une description plus complète des horizons sera vue, plus loin dans ce chapitre, au cours de l'étude des principales Références de sol.

1. Les horizons organiques (ou holorganiques) : O

Ils ont été déjà vus dans le chapitre consacré à l'humus ; nous n'y reviendrons plus ici.

2. Les horizons organo-minéraux (ou hémiorganiques) : A

Ils sont constitués d'un mélange de matière organique et de matière minérale et sont situés à la base des horizons holorganiques lorsque ceux-ci existent ou sinon à la partie supérieure du sol.

- Ce sont donc des horizons de surface et leur épaisseur est en général de l'ordre de quelques dizaines de cm.
- Ils sont plus riches en matière organique que les horizons sous-jacents ; leur teneur en matière organique est très variable : de 1 à 20 %. Cette teneur élevée en matière organique leur confère une coloration plus ou moins sombre.
- Ils sont à structure fragmentaire arrondie, largement influencée par la matière organique et par l'activité biologique.

♠ Dans les conditions favorables à une intense activité biologique, ils y aura un brassage biologique par les vers de terre de la totalité de la masse humique avec des particules minérales : la structure sera grumeleuse.

♠ Dans des conditions moins favorables, l'activité des vers de terre est réduite et la structure, microgrumeleuse, sera principalement due à des précipitations physico-chimiques (l'humine d'insolubilisation est majoritaire).

♠ Dans les conditions défavorables (très faible activité biologique, sans activité notable des vers de terre), il n'y a pas d'humine d'insolubilisation et peu d'humine microbienne, les complexes argilo-humiques sont rares. La matière organique est principalement sous forme d'humine d'héritage et se présente sous la forme de boulettes fécales juxtaposées aux particules minérales.

- On note la présence de nombreux pédotubules dus à l'activité biologique (galeries creusées par les vers de terre,...).
- Ils sont généralement appauvris en constituants minéraux : argiles, carbonates, hydroxydes. Par contre, ils sont souvent enrichis en sels solubles et, sur le complexe adsorbant, en cations et en anions.

3. Les horizons éluviaux :

Les horizons éluviaux E sont des horizons minéraux ou organo-minéraux nettement appauvris en fer et/ou en argiles fines ($< 2 \mu\text{m}$) et / ou en aluminium. C'est un horizon d'éluviation par entraînement vertical, oblique ou latéral des constituants cités ci-dessus.

Les principales caractéristiques de ces horizons sont les suivantes :

- Ils sont, en général, proches de la surface du sol, sous un horizon A. Leur épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres.
- Ils sont appauvris, non seulement en minéraux argileux, mais aussi en sels, en carbonates, en hydroxydes (Fe, Al,...). En général, l'appauvrissement en sels et en carbonates a précédé l'appauvrissement en éléments argileux, l'appauvrissement en hydroxydes étant, le plus souvent, conjoint à celui en éléments argileux.
- En conséquence des appauvrissements, les horizons E connaissent une concentration et donc un enrichissement relatif en constituants migrant moins facilement : limons, sables,...
- Leur couleur est toujours plus claire que celle de l'horizon sous-jacent.
- L'horizon E est beaucoup moins riche en carbone organique que l'horizon A sus-jacent.
- La structure est soit massive ou particulière, soit fragmentaire peu développée (peu nette) et fragile.

Le complexe adsorbant des horizons E est, normalement, partiellement ou totalement désaturés en cations basiques (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) ; leur PH est donc acide.

4. Les horizons illuviaux : B

Les horizons B sont des horizons enrichis en constituants, minéraux ou organiques, une partie de l'enrichissement étant la conséquence d'une migration de matière, verticale ou latérale. En règle générale, un horizon E ou A est présent au-dessus d'eux dans le solum, mais il peut avoir été érodé et ne plus exister.

Rappelons que l'enrichissement (en fer et/ou en argile et/ou en aluminium et/ou en humus) peut être dû :

- uniquement à des apports en provenance d'autres horizons superposés verticalement ou situés latéralement (apports illuviaux) ,
- ou à la combinaison d'apports illuviaux et de transformations sur place de minéraux préexistants (altération).

Les principaux types d'horizons B sont :

- BT (horizon B argilluvial , anciennement Bt) : **accumulations d'argiles.**
- BP (horizon B podzolique) : caractérisé par **l'accumulation de matières organiques et d'aluminium, avec ou non du fer.** On distingue notamment des horizons BP cimentés (= alios) et des BP meubles ou friables. Certains BP ont une teneur en carbone élevée par rapports aux teneurs en Al et Fe, ils paraissent noirâtres : on les désignera horizons **BP humifères ou BPh.**
Au contraire, d'autres BP ont une teneur très élevée en Al et Fe par rapport à la teneur en C : ce sont des **BP sesquioxydiques ou BPs.**

5. Les horizons d'altération à structure pédologique : S

L'horizon structural S (anciennement (B) dans la CPCS) est un horizon pédologique d'altération. Il est le siège de processus d'altération des minéraux primaires (avec libération d'oxydes ou d'hydroxydes de fer et d'Al) , de décarbonatation,...

Les caractéristiques principales de ces horizons sont les suivantes :

- appauvris, par rapport à la roche-mère, en constituants solubles (sels, carbonates,...) ;
- enrichis, par rapport à la roche-mère, en constituants issus de l'altération (sables, limons, argiles, hydroxydes) ;
- éventuellement très riches en argiles d'altération.

6. Les horizons hydromorphes : G et g

On distingue deux types d'horizons hydromorphes :

- les **horizons réductiques G** : il résultent d'un excès d'eau presque permanent, leur couleur est dominée par le gris, le vert , le bleu. Leur morphologie est à attribuer à la prédominance des processus de réduction du fer.
- les **horizons rédoxyques g ou -g** : ils résultent d'un excès d'eau temporaire et sont caractérisés par la présence de taches de couleur rouille. Leur morphologie résulte de la succession, dans le temps, de processus de réduction et de mobilisation du fer (périodes de saturation en eau), et de processus d'oxydation et d'immobilisation du fer (périodes de non saturation).

7. Les horizons d'altération à structures lithologiques : C

L'horizon C se situe à la base du sol, en continuité avec la roche-mère qui lui donne naissance. Les constituants de cet horizon ont subi une fragmentation importante et/ou une certaine altération chimique.

L'horizon C (ou roche-mère pédologique) peut subir une certaine illuviation (dépôts de CaCO_3 , gypse, argiles, sels) ou même une éluviation de certains éléments (sels solubles,...).

8. Les roches-mères : R, M ou D (roches-mères ou substrats)

Il s'agit de roches, dures ou meubles, non altérées (ou seulement très localement). Ce matériau peut être partiellement exploité par les racines.

On distingue les roches en termes de :

- **Couches R** : Roches dures, massives ou peu fragmentée (calcaires durs, grès, granites,...),
- **Couches M** : Roches meubles ou tendres non ou peu fragmentées. Ces couches sont cohérentes mais faciles à travailler avec des outils (craie, marne, sables, schistes,...).
- **Couches D** : Matériaux durs fragmentés puis déplacés ou transportés, non consolidés, formant un ensemble pseudo-meuble où les éléments grossiers dominant (éboulis, grève alluviale, moraines,...).

2ème PARTIE : ETUDE DES PRINCIPALES REFERENCES

I. Solums carbonatés et saturés

Il s'agit des sols qui évoluent dans une ambiance physico-chimique dominée par les ions Ca^{++} et, dans une moindre mesure, Mg^{++} .

Afin de caractériser l'abondance de ces ions, on emploiera souvent les termes suivants :

- **carbonaté** : qualifie un horizon ou un solum qui contient plus de 5 % de calcite ou de dolomite dans la terre fine. Il y a effervescence généralisée avec HCl à froid ou à chaud.
- **calcaire** : qualifie un horizon ou un solum carbonaté dans lequel le carbonate de calcium est seul présent ou est largement majoritaire (rapport molaire $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ supérieur à 8). Sera également qualifié de calcaire un horizon ou un solum non calcaire dans la terre fine mais contenant des graviers et cailloux calcaires en grand nombre.
- **dolomiteux** : qualifie un horizon ou un solum carbonaté qui présente un rapport molaire $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ compris entre 1,5 et 8.
- **dolomitique** : qualifie un horizon ou un solum carbonaté qui présente un rapport molaire $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ inférieur à 1,5. Il n'y a pas ou très peu d'effervescence à HCl à froid.
- **saturé** : qualifie un horizon ou un solum non carbonaté dont le complexe adsorbant est entièrement occupé par les cations échangeables alcalino-terreux et alcalins, c'est-à-dire principalement par Ca^{++} et Mg^{++} (d'où un rapport S/ T = $100 \pm 5\%$).
- **subsaturé** : qualifie un horizon ou un solum non carbonaté dont le complexe adsorbant est presque entièrement occupé par les cations échangeables alcalino-terreux et alcalins, c'est-à-dire principalement par Ca^{++} et Mg^{++} (d'où un rapport S/ T compris entre 80 et 95 %).
- **calcique** : qualifie un horizon ou un solum saturé ou presque, dans lequel Ca est largement dominant (rapport Ca / Mg supérieur à 5). Pas d'effervescence ou seulement localement ou ponctuellement.
- **calcimagnésique** : qualifie un horizon ou un solum saturé ou presque, dans lequel le rapport Ca / Mg est compris entre 5 et 2. Il n'y a que des effervescences ponctuelles ou locales.

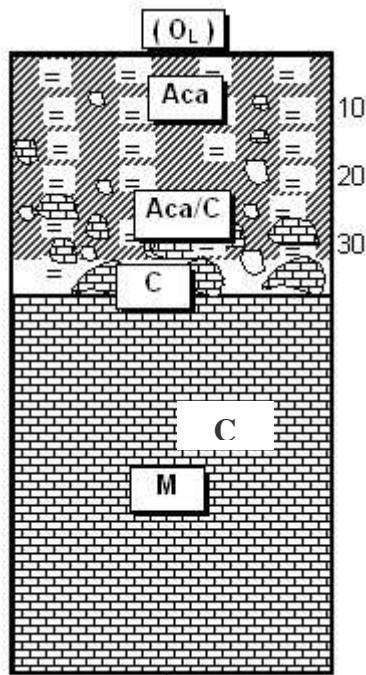
Date de description : 15 / 10 / 2005 (J-Y MASSENET)

Lieu : Forêt de Croixdalle (Seine maritime) – parcelle 485

Situation topographique : bas de versant

Géologie : Craie

Peuplement : perchis de hêtre

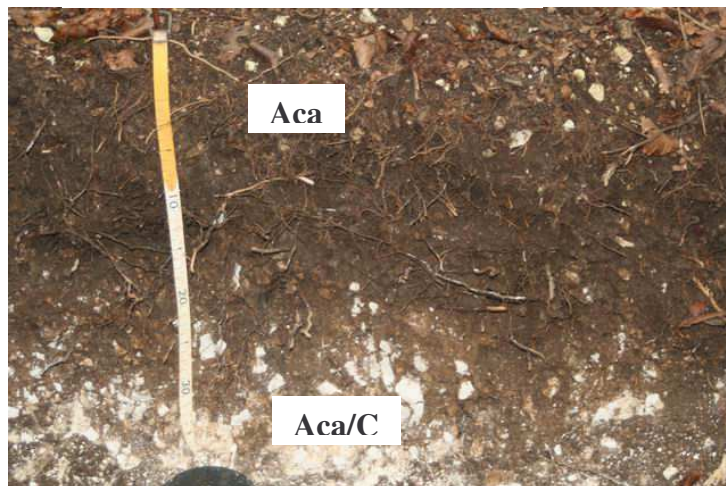


Aca (0 - 20 cm) : frais - limon argileux brun foncé (10 YR 3/1) - structure grumeleuse grossière très nette - charge en éléments grossiers assez forte (graviers et cailloux de silex, graviers de craie) - meuble - PH = 7,5 - Nombreuses racines très fines à grosses. Effervescence à HCL très forte généralisée.

Aca/C (20 - 30/35 cm) : frais - argilo-limoneux, brun foncé (7,5 YR 4/3) - structure polyédrique anguleuse grossière , très nette - charge en éléments grossiers assez forte (cailloux de silex) - débris de craie plus gros qu'en Aca et plus nombreux - peu compact puis assez compact - PH = 7,5 - 8 - Racines fines et grosses nombreuses . Effervescence à HCL forte localement.

C (35-45 cm) : Craie altérée : de nombreux morceaux de craie dure et quelques silex pris dans une masse argilo-calcaire beige jaunâtre. Racines fines peu nombreuses.

M (45 - + cm) : Craie blanche

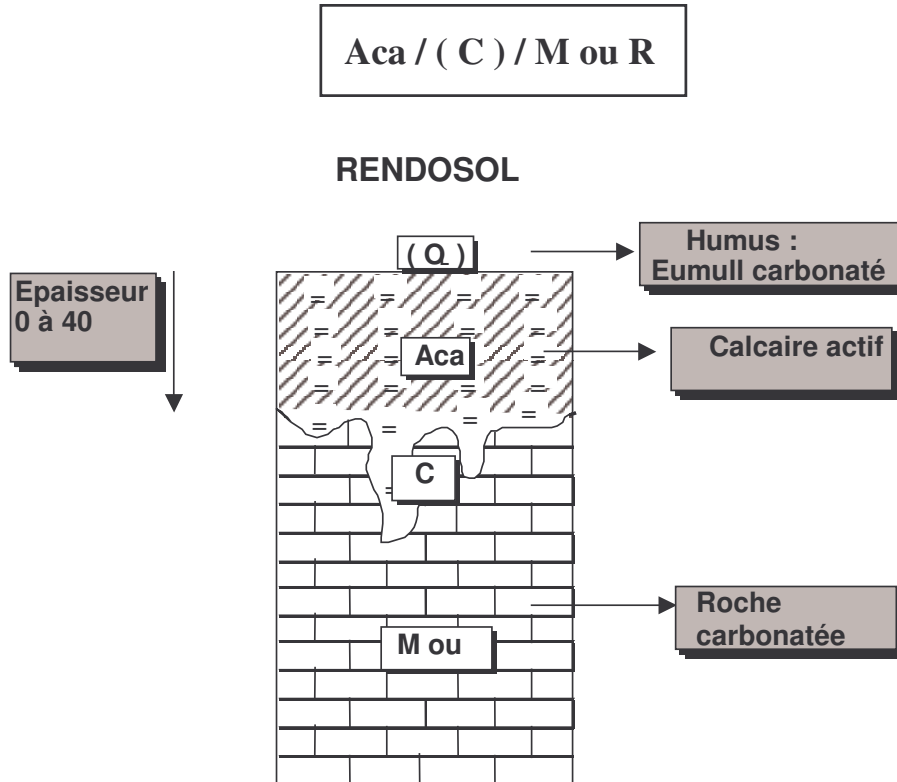


La photo se trouve sur le Cdrom

Figure 2 : Exemple de RENDOSOL

1.1. ☺ RENDOSOLS (Rendzines, CPCS)

A) Solum diagnostique :



Les horizons de référence sont :

Aca (horizon A calcaire) :

L'horizon Aca fait moins de 30-40 cm et possède les caractères suivants :

- effervescence à Hcl généralisée à froid (présence de calcaire actif dans la terre fine) ;
- taux de carbone : 1 à 8 % ;
- structure bien développée, fine, de type grumeleuse (parfois grenue ou polyédrique) ;
- PH compris entre 7 et 8,7 ;
- présence possible d'éléments grossiers calcaires ;
- complexe adsorbant saturé (S / T supérieur à 95 %), principalement par Ca^{++} .

C : horizon minéral de profondeur où la roche a subi une fragmentation importante ou / et une altération géochimique.

M : roche meuble ou tendre (craie, marne,...).

R : roche dure peu fragmentée (calcaire).

Un exemple est représenté à la figure 2

Horizon	Profondeur (cm)	Mat. Org. %	C %	N %	C/N	PH	Ca (meq/ 100 g)	Mg (meq / 100 g)	K (meq/ 100 g)	T (meq / 100 g)
Aca	0-10	9,6	5,61	0,704	8	7,7	54,2	1,38	0,347	30,3
Aca C	15-25	2,8	1,63	0,226	7	8,2	40,8	0,49	0,084	13
C	35-45					9				

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE
L'ANALYSE CHIMIQUE

RENDOSOL

P.H supérieur
à 7,5

Ca largement
dominant

C.E.C. élevée

C/N bas : mull carbonaté

Complexe
adsorbant saturé
S/T = 100 %

Figure 3 : Exemple d'analyse chimique d'un RENDOSOL

B) Caractéristiques générales :

Comme on peut le remarquer ci-contre (figure 3), les caractéristiques principales sont :

- un horizon Aca ayant une C.E.C. élevée (30 à 50 meq / 100g) et saturé (S / T supérieur à 95 %) avec une nette dominance du Ca^{++} .
- PH supérieur à 7,5.
- profondeur inférieure à 40 cm.

Les RENDOSOLS présentent également une structure très stable (abondance de calcium) et une très bonne aération. L'activité biologique (faune et flore du sol) y est intense, se traduisant par une bonne décomposition de la matière organique : l'humus y est du type mull carbonaté .

Malgré cela, les RENDOSOLS ont de multiples défauts :

Sur le plan physique :

- abondance fréquente d'éléments grossiers (sols difficiles à travailler) ;
- réserve d'eau généralement insuffisante en saison sèche (inconvénient pouvant être en partie compensé par une bonne pénétration des racines dans les horizons C, M ou R, ou encore par la porosité de la craie qui peut contenir une certaine quantité d'eau).

Sur le plan chimique :

- blocage de l'humification possible : les composés humiques étant stabilisés par l'abondance du calcaire actif, et protégés ainsi de la biodégradation. L'humus est alors du type mull carbonaté et l'horizon Aca prend souvent une couleur brun-noir traduisant l'abondance de matière organique (substances humiques évoluées).
- lorsque le calcaire actif devient abondant, le PH s'élève au-dessus de 7 : il en résulte plusieurs inconvénients : lenteur de la minéralisation de l'azote dont une grande partie est perdue par drainage sous la forme de nitrate, mauvaise représentation des ions K^+ et parfois Mg^{++} sur le complexe adsorbant, action insolubilisante du calcaire à l'égard du phosphore ou d'oligoéléments tels que le fer, manganèse, bore,... .

Suivant la réserve en eau de l'horizon C, M ou R, la végétation primitive peut être soit une forêt (milieu suffisamment humide) soit une fruticée (arbustes calcicoles), soit enfin une pelouse xérophile.

C) Pédogenèse : la formation des RENDOSOLS et évolution :

La formation et l'évolution des rendosols sont illustrées dans l'annexe 1 du cours (« Evolution des sols sur roche calcaire »).

Attaquée par le gel, l'hydratation et la dissolution par l'eau + dioxyde de carbone, vite colonisée par une végétation pionnière herbacée, une roche calcaire voit se former en surface un horizon Aca : un mélange de débris calcaires, de substances organiques, et d'une plus ou moins grande quantité d'argile de décarbonatation (beaucoup s'il s'agit de marnes, peu s'il s'agit de craie).

La roche fissurée, donne d'abord naissance à un LITHOSOL (sol d'épaisseur inférieure à 10 cm) puis, en s'approfondissant à un RENDOSOL. Cet approfondissement se fait à mesure que la végétation devient arbustive puis arborée et qu'augmente l'apport de matières organiques donc de CO₂, qui décarbonate petit à petit le profil de haut en bas.

L'horizon Aca , d'épaisseur comprise entre 10 et 40 cm, peut prendre différentes couleurs :

- noir : si la matière organique est abondante (12 à 15 % de M.O.) c'est le cas des RENDOSOLS humifères .
- en gris : si la matière organique est moins abondante : cas des pelouses xérophiles par exemple. le gris devient même presque blanc sur les pentes crayeuses récemment rajeunies par l'érosion.
- en brun : la matière organique n'est pas trop importante et ne masque plus la couleur brune des oxydes de fer. Le fer est en quantité assez importante. C'est le cas des « Rendzines brunifiées » de la C.P.C.S. .

La décarbonatation c'est-à-dire l'élimination progressive, à partir du haut du profil, du calcaire actif est le processus responsable de l'évolution des RENDOSOLS. La décarbonatation consiste en la dissolution des carbonates du sol par les eaux pluviales. En climat tempéré humide, les RENDOSOLS représentent une phase initiale de l'évolution des sols brunifiés sur les roches calcaires contenant des silicates. La décarbonatation intervient à un rythme plus ou moins rapide, les caractères de RENDOSOL ne pouvant se conserver que lorsqu'un apport de carbonate de calcium compense les pertes : c'est le cas pour les calcaires friables et très purs (craie), fortement rajeunis par l'érosion, ou le long des pentes d'affleurement calcaires, caractérisés par des RENDOSOLS d'érosion au sommet, et des RENDOSOLS colluviaux à la base.

En climat sec et en milieu peu perméable, la conservation des RENDOSOLS est évidemment mieux assurée.

1.2. ♠ LES RENDISOLS

Solum diagnostique :

Aci / (C) / M ou R

1.3. Les CALCOSOLS (Sols bruns calcaires, CPCS) et les CALCISOLS ☺ (Sols bruns calciques, CPCS)

A) Solums diagnostiques :

a) CALCOSOLS :

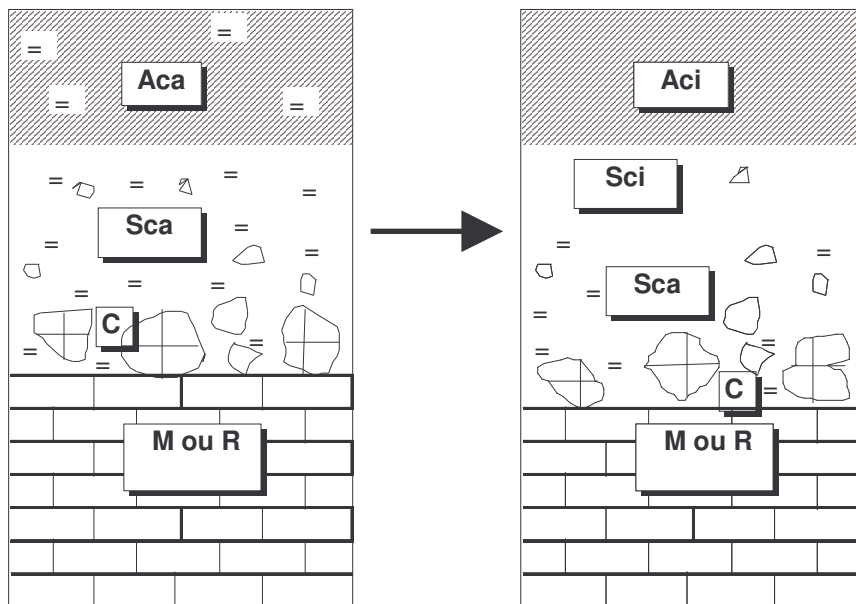
Aca / Sca / C / M ou R

ou

Aci / Sci / Sca / C / M ou R

où l'épaisseur de (Aci + Sci) est nettement inférieure à celle de Sca

CALCOSOLS



Un exemple est représenté à la figure 4.

Date de description : 15 / 10 / 2005 (J-Y MASSENET)

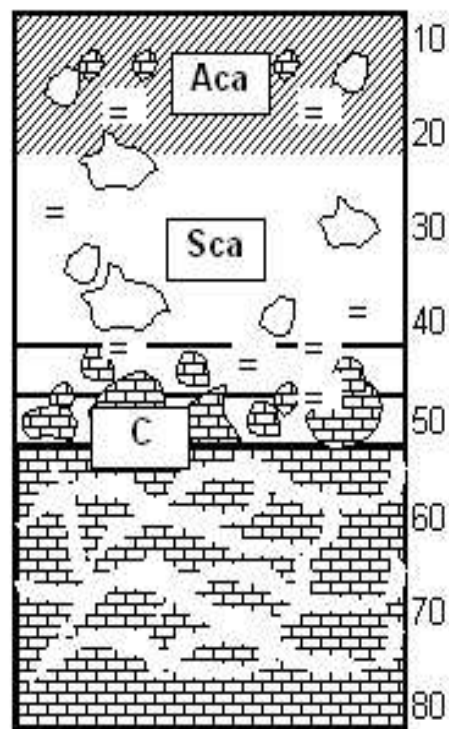
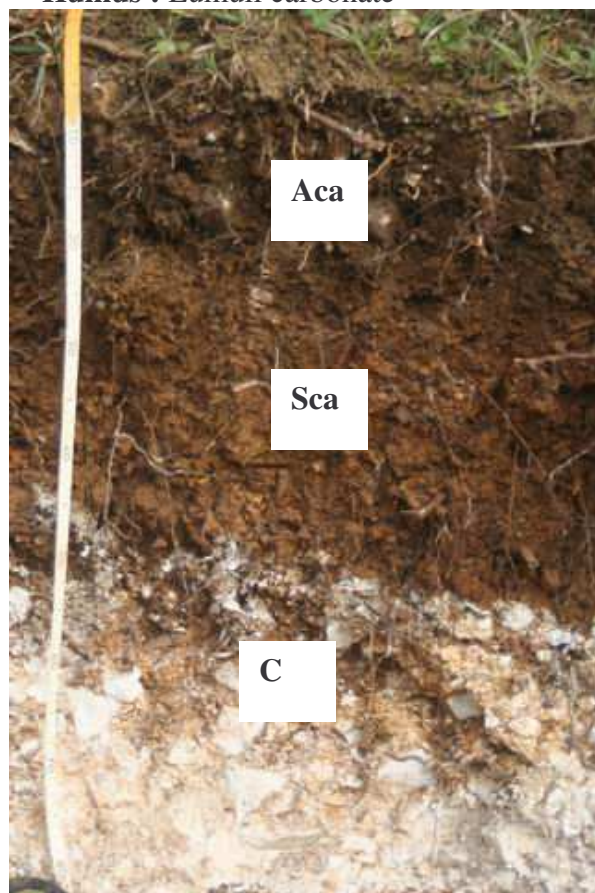
Lieu : Forêt de Croixdalle (Seine maritime) – parcelle 485

Situation topographique : milieu de versant

Géologie : Craie

Peuplement : plantation de hêtre

Humus : Eumull carbonaté



La photo se trouve sur le Cdrom

Aca (0 - 20 cm) : frais - limon argileux brun foncé (10 YR 4/3 à 3/3) - structure grumeleuse grossière très nette - charge en éléments grossiers assez forte (graviers et cailloux de silex, graviers de craie) - meuble - PH = 7,5 - Nombreuses racines très fines à grosses. Effervescence à HCL très forte.

Sca (20 - 55 cm) : frais - argilo-limoneux, brun (7,5 YR 6/6 à 5/6) - structure polyédrique anguleuse grossière, très nette - charge en éléments grossiers assez forte (cailloux de silex) - peu compact puis assez compact - PH = 7,5 - 8 - Racines fines et grosses nombreuses . Effervescence à HCL forte localement.

C (55-75 cm) : Craie fortement altérée : de nombreux morceaux de craie dure et quelques silex pris dans une masse argilo-calcaire beige jaunâtre. Racines fines peu nombreuses.

Figure 4 : Exemple de CALCOSOL

Horizons de référence :

Aca, C, M ou R : voir définitions plus haut.

Aci : horizon A calcique :

- Horizon A non carbonaté dans la terre fine ou seulement ponctuellement ou localement, comportant peu ou pas d'éléments grossiers calcaires.
- Le complexe adsorbant est saturé ou presque (rapport S / T supérieur à 80 %) principalement par Ca^{++} qui domine largement (rapport Ca / Mg supérieur à 5).
- Le taux de carbone est inférieur à 8 % .

Sca : horizon S calcaire :

- Horizon S présentant une effervescence à HCl généralisée à froid (présence de calcaire actif).
- Complexe adsorbant saturé (rapport S / T supérieur à 95 %), principalement par le Ca^{++} .
- Horizon comportant souvent des éléments grossiers calcaires.
- Structure polyédrique ou prismatique.
- Taux de carbone inférieur à 1 % (sinon : notation Scah).
- Le % d'argile de décarbonatation augmente par rapport à l'horizon supérieur.

Sci : horizon S calcique :

- Horizon S non carbonaté (pas de calcaire actif) dans la terre fine ou seulement ponctuellement ou localement.
- Structure polyédrique ou prismatique.
- Complexe adsorbant saturé ou subsaturé (rapport S / T supérieur à 80 %), principalement par le Ca^{++} qui domine largement (rapport Ca / Mg supérieur à 5).
- Taux de carbone inférieur à 1 % .
- Le % d'argile de décarbonatation augmente par rapport à l'horizon supérieur.

Un exemple d'analyse chimique d'un CALCOSOL est représenté à la figure 5.

Figure 5 : Exemple d'analyse chimique d'un CALCOSOL

Horizon	Profondeur (cm)	Mat. Org.	C %	N %	C/N	PH	Ca (meq/ 100	Mg (meq / 100 g	K (meq/ 100 g	T (meq / 100 g	S / T %
Aca	0-10	5,5	3,19	0,339	9	7,7	38,6	0,5	0,197	16,4	sat
Sca	40-50	1,6	0,92	0,11	8	8	35,2	0,27	1,104	8,8	sat
Sca / C	80-90					7,9	38,3	0,24	0,144	13,1	sat

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'ANALYSE CHIMIQUE

CALCOSOL

le taux de carbone de Sca est inf à 1 %

Le Ca domine largement sur le complexe adsorbant

S / T supérieur à 95 %

C.E.C inférieure à celle de l'horizon Aca car moins de matières organiques

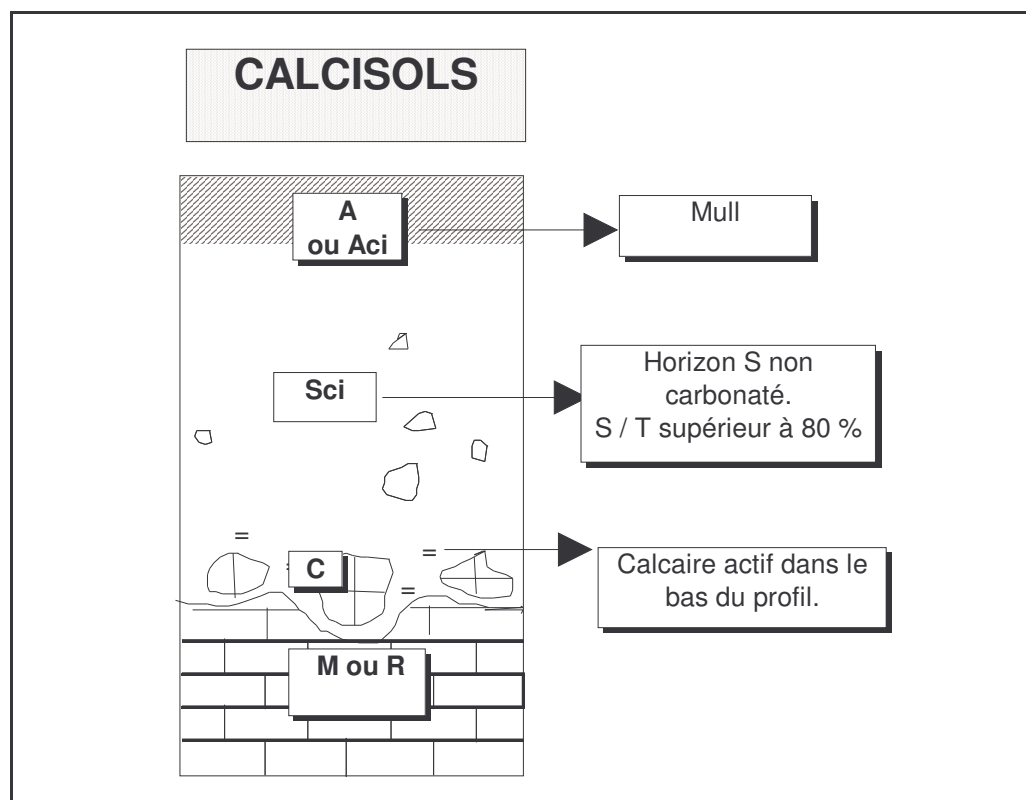
b) CALCISOLS

Aci / Sci / Sca / C / M ou R

où l'épaisseur de (Aci + Sci) est nettement supérieur à celle de Sca

ou

A ou Aci / Sci / C / M ou R



Un exemple de CALCOSOL est représenté à la figure 6 et une analyse chimique est présentée à la figure7.

Date de description : 15 / 10 / 2005 (J-Y MASSENET)

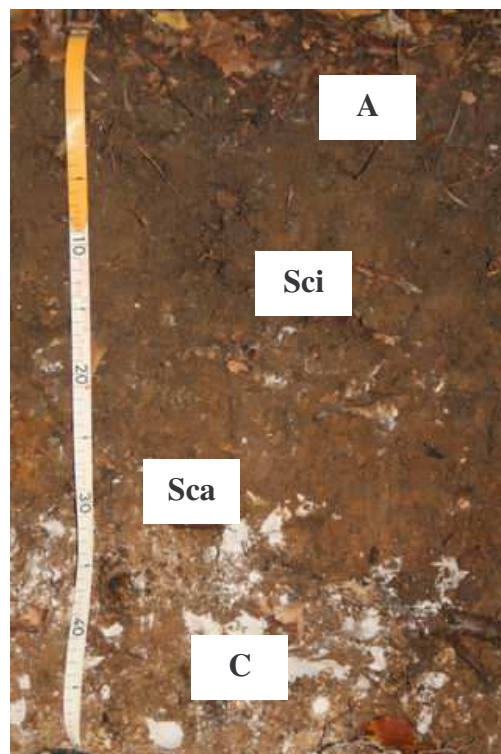
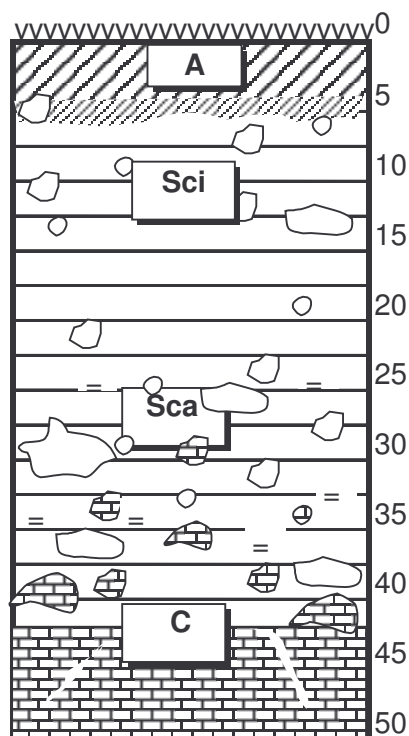
Lieu : Forêt de Croixdalle (Seine maritime) – parcelle 502

Situation topographique : haut de versant

Géologie : Argile de décarbonatation sur craie

Peuplement : futaie adulte de hêtre et chênes

Humus : Mésomull



La photo se trouve sur le Cdrom

A (0 - 8cm) : frais - argilo-limoneux, brun (10 YR 4/4) - charge en éléments grossiers assez forte (graviers et cailloux de silex) - structure polyédrique subanguleuse grossière à sous structure grumeleuse nette - meuble à peu compact - racines très fines à moyennes nombreuses - PH = 5,5 .

Sci puis Sca (8- 30cm) : frais - argilo-limoneux, brun (7,5 YR 5/4) - charge en éléments grossiers assez forte (cailloux et pierres de silex) - structure polyédrique subangulaire nette, grossière - compact - racines fines à grosses communes - PH = 6,5 . Effervescences à HCL localisées dans la partie inférieure de l'horizon (Sca) - Transition progressive.

C (30 - 45 cm) : frais - argilo-limoneux, brun (7,5 YR 5/4 à 6/4) - forte charge en éléments grossiers (>50 % ; cailloux, pierres et graviers de silex) - nombreux débris de craie (jusqu'à 5 cm de grosseur)- structure polyédrique grossière, très nette - compact - racines fines à très grosses communes - Effervescence à HCl généralisée - PH = 8.

M (45 - + cm) : Craie

Figure 6 : Exemple de CALCISOL

Figure 7 : Exemple d'analyse chimique d'un CALCISOL

Horizon	Profondeur (cm)	Ca CO ₃	C %	N %	C/N	PH	Ca (meq/ 100	Mg (meq / 100 g	K (meq/ 100 g	T (meq / 100 g	S / T %
Aci	0 - 5	0%	3,45	0,285	9	5,9	11,1	1,22	0,564	13,7	94
Sci	30 - 35	0,30%	1,05	0,117	8	7,1	16,7	0,65	0,099	12,6	sat
C	50 - 55	14,30%				7,8	36,6	0,43	0,089	12,1	sat

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'ANALYSE CHIMIQUE

CALCISOL

Le calcaire actif disparaît des horizons supérieurs

La décarbonatation se poursuit à partir du haut du profil (comparez avec le calcosol) : le PH diminue et le Ca devient moins abondant.

Rapport S / T supérieur à 80 %

c) Cas des intergrades (cas intermédiaires)

Lorsque l'épaisseur de (Aci + Sci) est du même ordre que celle de Sca, on identifiera le sol étudié à un CALCISOL-CALCOSOL.

B) Pédogenèse :

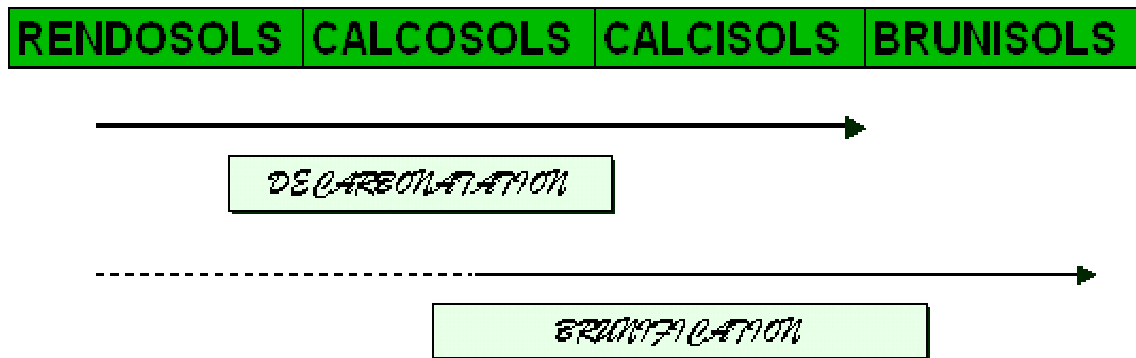
Dans la séquence évolutive sols carbonatés-sols brunifiés sur calcaire présenté à l'annexe 1, les CALCOSOLS et les CALCISOLS représentent les étapes intermédiaires :

RENDOSOL → CALCOSOL → CALCISOL → BRUNISOL

La **DECARBONATATION** part du sommet du profil, et progresse vers le bas, donnant ainsi naissance, d'abord aux CALCOSOLS, puis aux CALCISOLS (dans lesquels le calcaire actif n'est présent que dans la partie inférieure du profil).

La couleur brune de ces sols traduit **le remplacement du Ca^{++} par le Fe^{+++} dans la liaison argile-humus (ponts calciques remplacés progressivement par des ponts ferriques)**. Ce processus s'appelle la **BRUNIFICATION**.

La **brunification** (figure 8) s'observe sur tous matériaux, bien drainés, non calcaires ou préalablement décarbonatés, mais libérant en quantité suffisante de l'argile et des oxydes de fer libres. Sur matériaux contenant des carbonates (marnes), la phase de brunification suit celle de la décarbonatation, après élimination progressive du calcaire actif, et aussi d'une partie du calcium échangeable (le calcaire actif est , dans les CALCISOLS et les CALCOSOLS, en quantité insuffisante par rapport à l'argile et au fer libre, pour ralentir le processus de brunification). En même temps, le stock de matière organique diminue, le cycle biogéochimique des éléments s'accélère, l'humus, dont le PH se stabilise entre 5 et 6 (on arrive aux BRUNISOLS), se localisant dans les seuls horizons de surface. L'horizon S brun, coloré par les oxydes de fer étroitement liés aux argiles, prend un développement croissant.



C) Caractéristiques physiques et chimiques :

Sur le plan chimique, les CALCISOLS et les CALCOSOLS sont moins défavorables que les RENDOSOLS, car le calcaire actif, moins abondant cesse d'exercer une action nocive, tout en conservant une influence favorable sur la structure.

Les propriétés physiques, par contre, sont très variables, suivant l'épaisseur, la teneur en cailloux,... du profil. Le hêtre s'accommode bien de ces sols.

La décarbonatation et l'altération d'une roche suffisamment pourvue en argile donne naissance à un horizon S ayant une certaine teneur en argile, ce qui explique une certaine compacité de cet horizon. Dans ce cas, les chênes sessiles et pédonculés conviennent mieux à la mise en valeur de ces sols. Le merisier donne aussi de bons résultats lorsque la réserve en eau est bonne et que les horizons S ne sont pas trop argileux.

II. BRUNISOLS (Sols bruns, CPCS)

Le terme SOL BRUN fut appliqué pour la première fois en Europe par Ramann il y a plus de 50 ans. Il servait à désigner les sols de l'Europe Occidentale se développant naturellement sous forêts feuillues caduques.

L'épithète « brun » fait allusion à la teinte prise par les argiles complexées avec des oxydes de fer hydratés.

2.1. Solum diagnostique :

Les BRUNISOLS sont caractérisés par la présence d'un horizon structural S très bien développé et possédant une notable macroporosité fissurale et biologique.

Le solum diagnostique (schéma en figure 8 et exemple en figure 9) est, sous forêts :

A / S / C / M ou R

L'humus est en général un eumull ou un mésomull, plus rarement un oligomull .

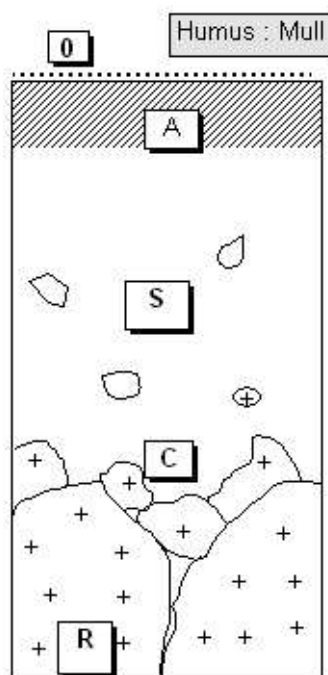


Figure 8 : Schéma type d'un BRUNISOL

Figure 9 : exemple de BRUNISOL mésosaturé

Date de description : 15 / 10 / 2005 (J-Y MASSENET)

Lieu : Forêt de Croixdalle (Seine maritime) – parcelle 491

Situation topographique : bord de plateau

Géologie : limon sur argile résiduelle à silex

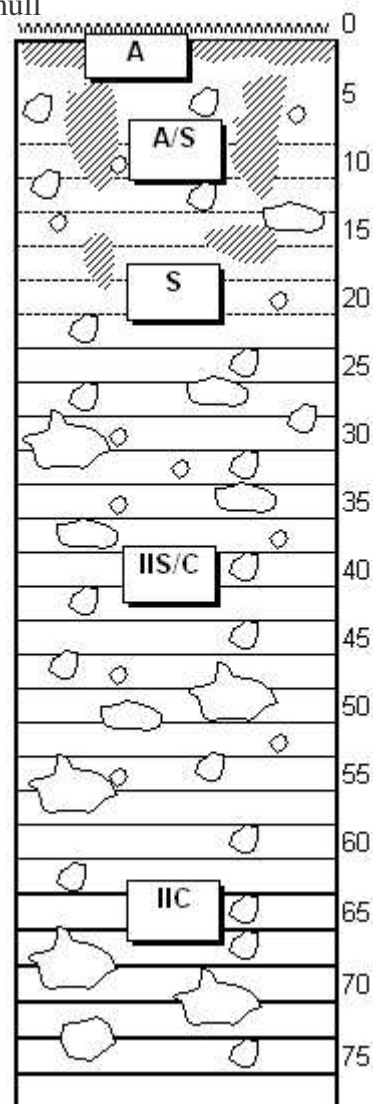
Peuplement : taillis avec réserve de hêtre, chênes sessile et pédonculé, merisier



BRUNISOL mésosaturé

La photo se trouve sur le cd rom

Humus : Mésomull



A (0 - 7cm) : frais - limon argileux brun (10 YR 4/3) - charge en éléments grossiers assez forte (graviers et cailloux de silex) - structure polyédrique subanguleuse grossière à sous structure grumeleuse nette - meuble à peu compact - racines très fines à grosses nombreuses - PH = 5 .

A/S (7 - 30cm) : frais - argilo-limoneux à limono-argileux, brun jaune (10 YR 5/6) - infiltrations humifères (10 YR 5/3 à 5/4) - charge en éléments grossiers assez forte (graviers, cailloux et pierres de silex) - structure polyédrique subangulaire nette, grossière - assez compact à compact - racines fines à grosses communes - PH = 5 . Transition progressive.

IIS/C (30 - 65 cm) : horizon de transition - frais - argilo-limoneux, brun (7,5YR 5/6) avec plages brun-rougeâtres (5YR 5/6) - forte charge en éléments grossiers (50 % ; cailloux, pierres et blocs de silex) -structure polyédrique grossière, nette - compact - racines fines à moyennes peu nombreuses- PH = 5

IIC (65 - 100 et + cm) : frais - argile brun-rouge (7,5 à 5 YR 5/6) - très forte charge en éléments grossiers (>50 % ; cailloux, pierres et blocs de silex) -structure polyédrique grossière, très nette - très compact - racines fines rares - PH = 5.

Horizons de Référence :

A : il présente une structure construite d'origine biologique (on dit qu'il est biomacrostructuré) grumeleuse. Cette structure résulte d'un brassage biologique par les vers de terre, de la totalité de la masse humique avec des particules minérales fines (argiles). Cette activité biologique favorise la constitution de complexes argile-fer-humus stables. Selon l'importance de l'activité biologique, la structure sera plus ou moins affirmée (grumeaux plus ou moins gros).

S : cet horizon n'est jamais calcaire (à la différence de Sca). Son PH est presque toujours compris entre 5 et 6,5 (sous forêt).

C, M ou R : les roches-mères peuvent être des schistes, des grès, des roches magmatiques basiques (diorites, gabbros, basaltes, andésite,...), des gneiss, des alluvions anciennes ,... . En fait, les BRUNISOLS se développent sur tous matériaux non calcaires (ou préalablement décarbonatés), mais libérant suffisamment de fer et d'argiles fines.

2.2. Références :

On distingue 4 Références. Elles sont distinguées en fonction du rapport S / T dans l'horizon S :

REFERENCES	RAPPORT S / T
BRUNISOL SATURE	80 à 100 %
BRUNISOL MESOSATURE	50 à 80 %
BRUNISOL OLIGO-SATURE	20 à 50 %
BRUNISOL RESATURE	complexe resaturé par la mise en culture. PH supérieur à 6

2.3. Pédogenèse :

A) La brunification

On observe les BRUNISOLS surtout sous les climats tempérés atlantiques ou semi-continentaux., où règne la forêt feuillue. Le processus pédogénétique régnant dans la formation de ces sols est la **BRUNIFICATION**.

La brunification consiste en :

- la libération de fer au cours de l'altération des minéraux silicatés, par hydrolyse acide progressive et modérée ;
- l'insolubilisation par ce fer des substances pré-humiques qui vont alors former un mull plus ou moins acide ;
- l'association ARGILE-FER-HUMUS, le fer formant des pont ferriques entre les deux colloïdes.

Cette **brunification** (figure 10) se produit dans les conditions suivantes :

- sous climat tempéré atlantique ou semi-continentale; de plaine ou de basse montagne.
- sous végétation « améliorante » apte à fournir le mull : la forêt de feuillus ou, en basse montagne, la forêt mixte résineux-feuillus.
- en ce qui concerne la roche-mère, on a vu plus haut que les BRUNISOLS se développent sur tous matériaux non calcaires , mais libérant suffisamment de fer et d'argiles fines. Les matériaux calcaires ne donnent naissance à des BRUNISOLS que lorsqu'ils ont subi une décarbonatation préalable.
- une aération suffisante pour maintenir le fer oxydé à l'état ferrique Fe^{+++} .

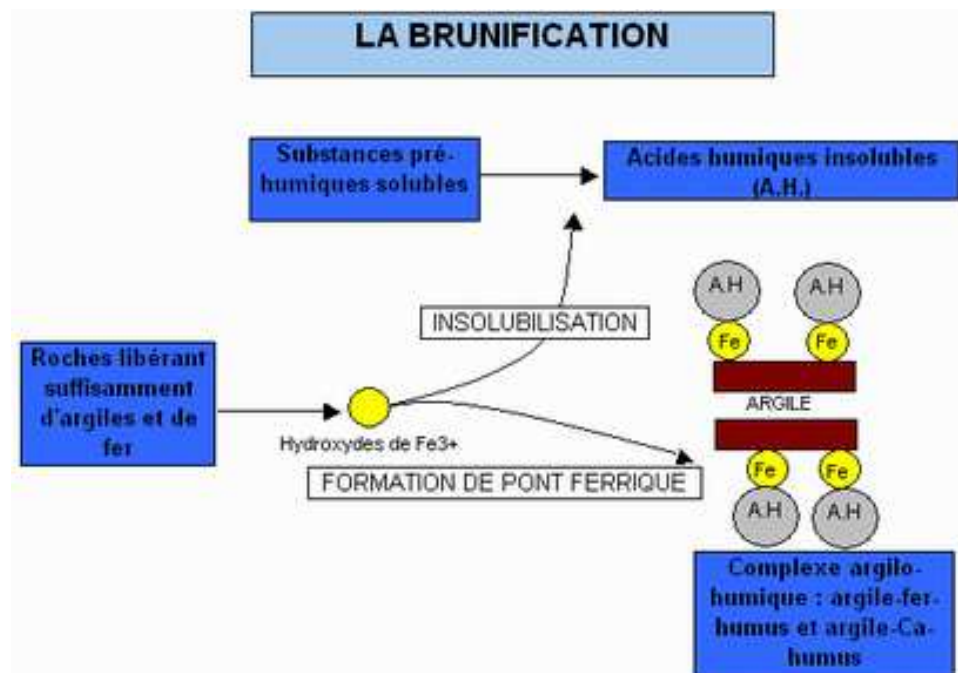


Figure 10 : La brunification

B. Facteurs écologiques ralentissant la différenciation texturale par illuviation d'argiles :

Les BRUNISOLS ne présentent pas d'horizons E ni BT. Cela ne veut pas dire qu'ils ne connaissent aucun mouvement d'argile, mais que le profil du solum ne montre pas de différenciation texturale notable (**migration d'argile faible**). Ce sont donc des sols brunifiés non argilluviés

Les BRUNISOLS sont observés dans le cas de sols "jeunes" (ou rajeunis par l'érosion par exemple) où la pédogenèse est encore récente ou bien , pour les sols les plus anciens, chaque fois que l'illuviation est ralentie ou peu favorisée. Comme on le verra ci-dessous, c'est surtout la composition de ou la nature du matériau qui favorise ou ralentit le lessivage (illuviation) des argiles.

a . Influence du type de matériau parental

Les limons éoliens suffisamment perméables, profonds et non calcaires sont des matériaux favorisant le lessivage car ils sont pauvres en minéraux primaires altérables et l'argilogenèse y reste donc très limitée. Celle-ci ne peut compenser le lessivage des argiles fines préexistantes (montmorillonites). Les sols formés seront donc des NEOLUVISOLS et des LUVISOLS.

Les matériaux qui freinent le lessivage favorisent quant à eux la formation de BRUNISOLS.

On peut distinguer parmi ces matériaux **des roches sédimentaires (schistes, grès (sauf les roches très quartzieuses, acides), argiles de décarbonatation,...) ou des roches magmatiques (certains granites, basalte, diorites, gabbros,...)**. En fait, ces roches doivent donner des matériaux suffisamment riches en argiles , fer et calcium. Ces deux derniers éléments donnent notamment des agrégats très résistants à l'action dispersante de l'eau. Pour certaines de ces roches, la richesse en argiles diminue la perméabilité, la percolation et donc l'entraînement des particules fines.

Pour d'autres, intervient un phénomène de compensation entre l'altération et le lessivage des argiles : l'altération des minéraux primaires libérant une quantité d'argile plus élevée en surface qu'en profondeur compense le lessivage (voir figure 11).

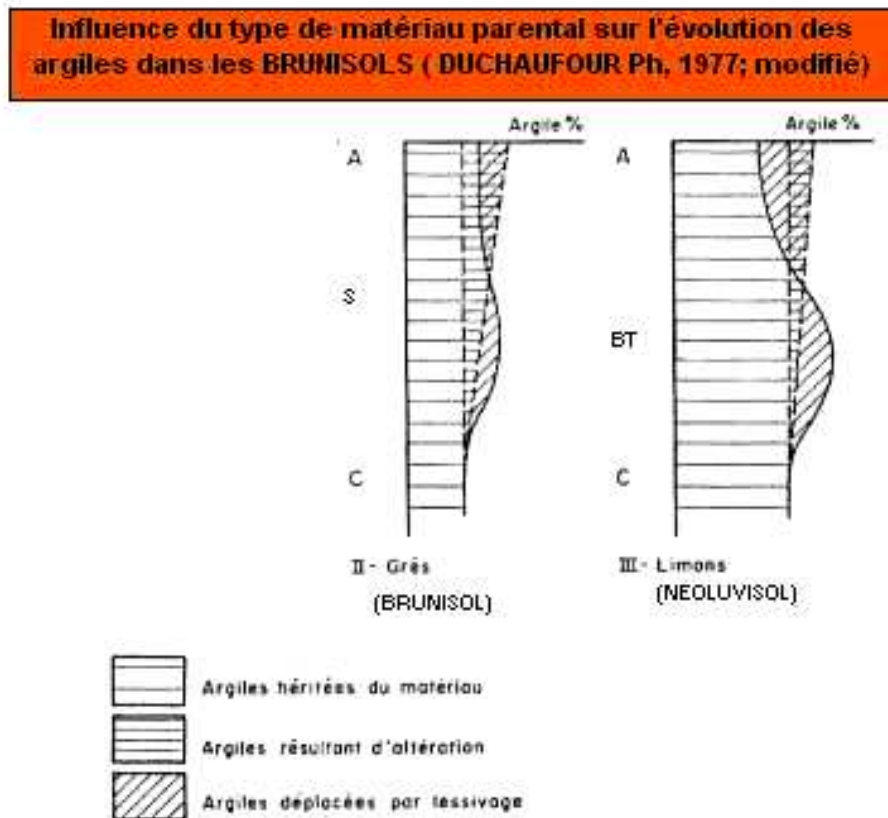


Figure 11 : Influence du type de matériau sur l'évolution des argiles dans les BRUNISOLS

b . Influence du climat

Précédemment, nous avons dit que les BRUNISOLS se rencontraient en climat tempéré, atlantique ou semi-continental.

Toutefois, il faut remarquer qu'en climat océanique, le lessivage sera favorisé par les facteurs suivants :

- des précipitations importantes,
- une certaine fraîcheur en été ,
- une nébulosité importante (insolation annuelle faible).

Ce type de climat, rencontré en Normandie et en Bretagne par exemple, ne favorise pas l'activité biologique des sols et une bonne décomposition des matières organiques. Ainsi, les phénomènes de lessivage, mais aussi de podzolisation, sont accentués.

Par contre, en climat à tendance continentale, les BRUNISOLS seront beaucoup plus fréquents. En effet, sous ce type de climat, la pluviosité est essentiellement estivale. Or, on sait que les pluies d'été imprègnent peu le profil (l'évapotranspiration étant importante à cette époque de l'année) et par conséquent, l'entraînement des argiles fines est limité..

2.4. Potentialités :

Les BRUNISOLS sont souvent de bons sols forestiers sur un plan chimique. Leur potentialités dépendront des facteurs physiques suivants :

- profondeur prospectable ;
- importance de la réserve en eau et régime hydrique ;
- position topographique, exposition.

Comme on le verra par la suite, les BRUNISOLS occupe une situation de « plaque tournante » dans l'évolution des sols tempérés entre les sols peu évolués (RANKOSOLS, RENDOSOLS par exemple) d'une part et des types plus différenciés d'autre part (LUVISOL par exemple).

III. Solums oligosaturés sur roche-mère acide : RANKOSOLS et ALOCRISOLS

3.1. Les RANKOSOLS : (Rankers alpins et Rankers d'érosion , CPCS)

Les RANKOSOLS sont en fait les équivalents des RENDOSOLS en milieux cristallins.

A) Solum diagnostique :

O / A ou Ah / C / M ou R

Les RANKOSOLS correspondent à des solums peu différenciés dont l'épaisseur n'excède pas 40 cm (tout en étant supérieure à 10 cm) :

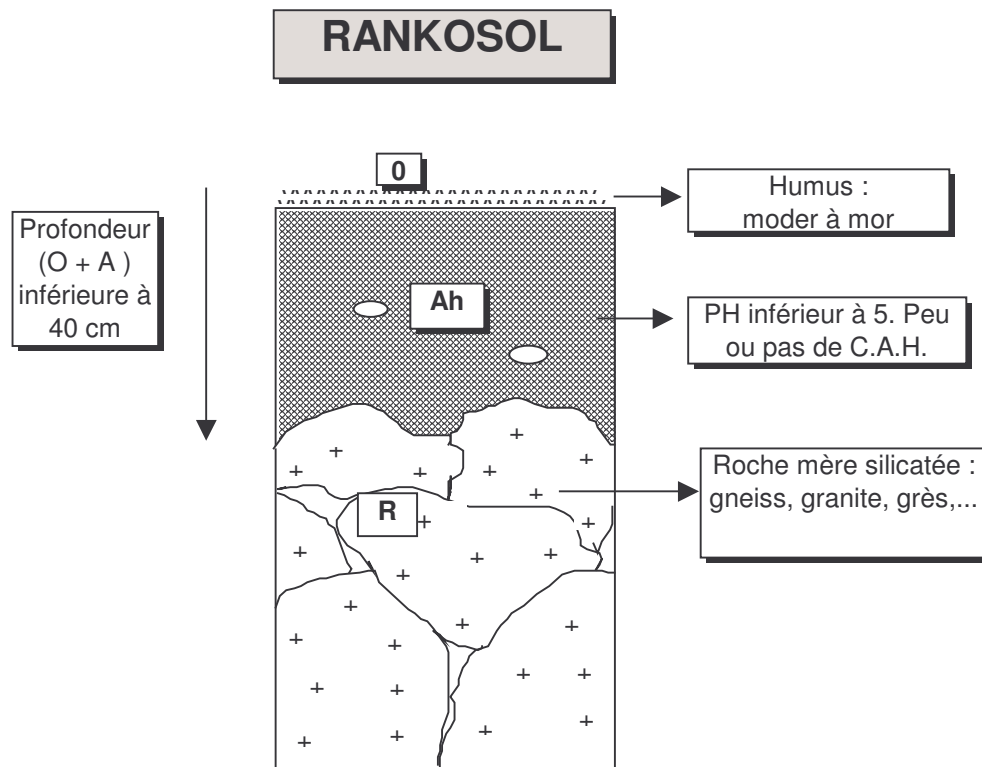


Figure 12 : Schéma type d'un RANKOSOL

Horizons de référence :

- **Ah** : horizon A humifère c'est-à-dire contenant plus de 5 % de carbone organique
- **A** : cet horizon contient moins de 5 % de carbone organique.
- **C,M ou R** : Roche-mère : roche magmatique acide (granite,...), gneiss, grès, schistes.

B) Ecologie , pédogenèse et potentialités :

Les RANKOSOLS sont des sols peu différenciés mais qui ont des origines diverses :

- pour les uns, la faible évolution est liée uniquement à une situation sur pentes fortes : ces sols sont contamment rajeunis. Ce sont les **RANKOSOLS d'érosion** (Rankers d'érosion, CPCS).
- pour d'autres, la faible évolution résulte d'un équilibre avec le climat et la végétation : on les observe dans les zones de hautes altitudes ou de hautes latitudes, situées au-dessus de la limite thermique de la végétation forestière. La température moyenne très basse ralentit l'activité biologique et les processus biochimiques d'altération. Ce sont les **RANKOSOLS alpins** (Rankers alpin, CPCS) et les RANKOSOLS arctiques.

Les RANKOSOLS alpins sont comme le qualificatif l'indique, caractéristiques de l'étage alpin, sur affleurement de roche dure et acide. Ils sont occupés par la pelouse ou la lande alpine (callune).

Les RANKOSOLS d'érosion sont des sols à faibles potentialités, manquant de profondeur, donc de réserve en eau, et de réserves en éléments nutritifs directement assimilables (lixiviation importante en climat arrosé) . Ils portent souvent de maigres forêts résineuses (étage subalpin ou montagnard) ou feuillues (chênaies sessiliflores notamment) .

En supposant que l'érosion soit freinée, ces sols évolueraient par décomposition de plus en plus profonde de la roche-mère, soit vers des ALOCRISOLS (conditions les moins favorables), soit vers des PODZOSOLS (voir plus loin).

Figure 13 : exemple d'ALOCRISOL TYPIQUE

Date de description : octobre 2005 (J-Y MASSENET)

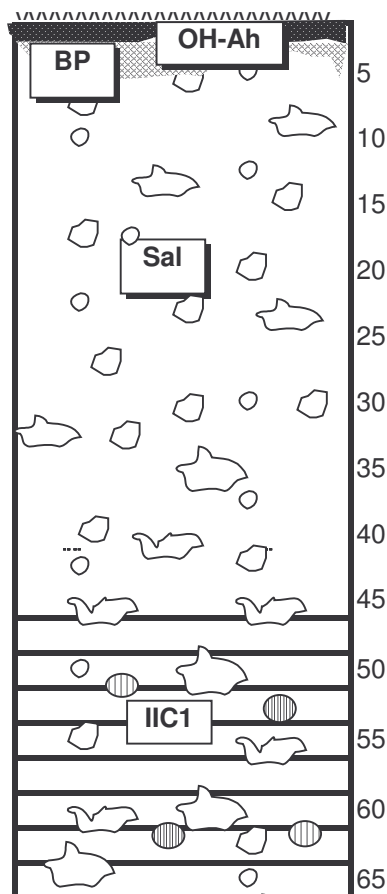
Lieu : Massif du Croc (Seine maritime) – parcelle 44

Situation topographique : milieu de versant

Géologie : limon à silex sur argile résiduelle à silex

Peuplement : futaie régulière adulte de hêtre

Humus : Eumoder



Les photos se trouvent sur le cd rom
Sol brun ocreux

OH -Ah (0 - 4 cm) : frais - limon brun gris foncé (10 YR 3/2)

- structure grumeleuse fine, parfois grumeleuse - assez forte charge en graviers et cailloux de silex - meuble - PH = 4,5
Racines très fines à fines très nombreuses.

BP (4 - 5/9 cm) : frais - limon brun rosé (7,5 YR 5/3) -

structure polyédrique subanguleuse fine à moyenne, nette - forte charge en graviers et cailloux de silex - peu compact - PH = 4,5
Racines très fines à fines communes. Limite inférieure

Sal (5/9 - 45cm) : frais - limon jaune-brun (10 YR 5/8) -

structure polyédrique subanguleuse moyenne - assez compact- forte charge en graviers, cailloux et pierres de silex - Racines fines à moyennes communes - PH = 4,5 . Limite inférieure ondulée.

II C1 (45 - 65cm) : frais - argileux, brun-rouge (7,5 YR 5/6 à

5 YR 5/6) - structure polyédrique anguleuse moyenne à grossière - charge en cailloux et pierres de silex forte - assez compact à compact - Présences de revêtements Fe-Mn - Racines fines à moyennes communes - PH = 4,5 - 5



3.2. Les ALOCRISOLS (Sols bruns acides, Sols bruns ocreux , CPCS)

On observe souvent ces sols sous forêts ou végétation naturelle, développés à partir d'altérites (résidus de l'altération de la roche) de roches cristallines acides (« arènes » granitiques par exemple) ou d'altérites de schistes, dans le Massif Armoricaïn, dans les Vosges, en Morvan, dans le Massif Central, etc.

A) Solum diagnostique :

a) Horizon de Référence : l'horizon Sal

Les ALOCRISOLS se caractérisent par la présence de l'horizon Sal (horizon S aluminique).

Celui-ci possède les caractéristiques suivantes :

- structure spécifique formée de la combinaison d'une structure polyédrique subanguleuse et d'une structure grumeleuse très fine (microgrumeleuse) ;
- PH acide ou très acide, inférieur à 5,0, tamponné par l'aluminium ;
- Al+++ représente de 20 à 50 % de la CEC ;
- rapport Al+++ / S supérieur à 2, pouvant atteindre 20 , avec S = Somme des bases échangeables ;
- taux de saturation très faible, rapport S / T inférieur à 20 - 30 %.

Suite à l'altération des minéraux primaires, l'horizon Sal présente souvent des taux d'argile supérieurs à ceux des horizons ou des couches sous-jacentes.

Cet horizon se situe sous un horizon A oligosaturé (S / T compris entre 20 et 50 %) à désaturé (S / T inférieur à 20 %) plus ou moins riche en matières organiques.

b) REFERENCES :

On distingue deux Références :

1°) ALOCRISOLS TYPIQUES :

Ces sols possèdent une couleur ocreuse typique.

Ils présentent un solum diagnostique du type (voir exemple en figure 13) :

A / Sal / C / R ou Ah / Sal / C / R (type humifère)

Contrairement à A, Ah possède un taux de carbone organique supérieur à 4 %. L'humus le plus fréquent est un mull acide ou un moder.

Horizon	Profondeur (cm)	Mat. Org. %	C %	N %	C/N	PH	Ca (meq/ 100 g)	Mg (meq / 100 g)	K (meq/ 100 g)	T (meq / 100 g)	S / T %
Ah	0 - 3	11,4	6,62	0,42	16	3,7	2,0	0,32	0,237	14,2	18,0
Sal	15 - 25	1,5	0,87	0,05	17	4,1	0,1	0,04	0,049	4,5	4,2
II Sal	45 - 55					4,3	0,2	0,03	0,061	3,6	8,1
III C	80 - 90					5,0	20,2	3,46	0,191	25,8	92,4

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'ANALYSE CHIMIQUE

ALOCRISOL TYPIQUE humifère

Humus : mull acide

PH bas, inférieur à 5

Taux de carbone organique supérieur à 4 %

S / T inférieur à 20 %

Figure 14 : Exemple d'analyse chimique d'un ALOCRISOL TYPIQUE

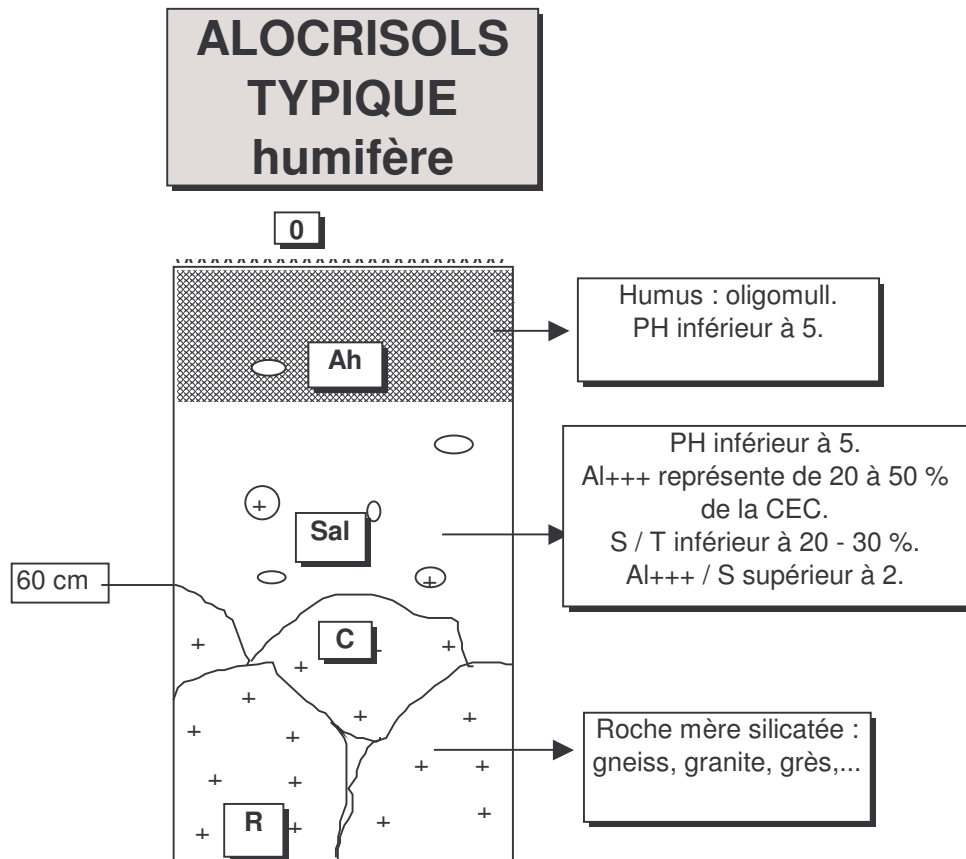


Figure 15 : Schéma type d'un ALOCRISOL TYPIQUE

2°) ALOCRISOLS HUMIQUES :

Suite à des conditions pédoclimatiques rudes (situation d'ubac ou climat général froid) ou à des effets de toxicité, l'activité biologique est faible, la minéralisation des matières organiques se fait mal et celles-ci s'accumulent en surface mais imprègnent aussi la partie supérieure du solum sur les 40 à 80 premiers centimètres.

Le solum est de type :

Ah / Salh / C / R	ou	Ah / Salh / Sal / C / R
--------------------------	-----------	--------------------------------

Contrairement à Sal, Salh possède un taux de carbone organique supérieur à 2 %. L'horizon Ah est très acide, riche en aluminium, il présente une structure microgrumeleuse très aérée et des teneurs en matières organiques très élevées : de 6 à 20 % de carbone organique dans l'horizon de surface Ah1, et de 4 à 12 % en dessous (horizon Ah2).

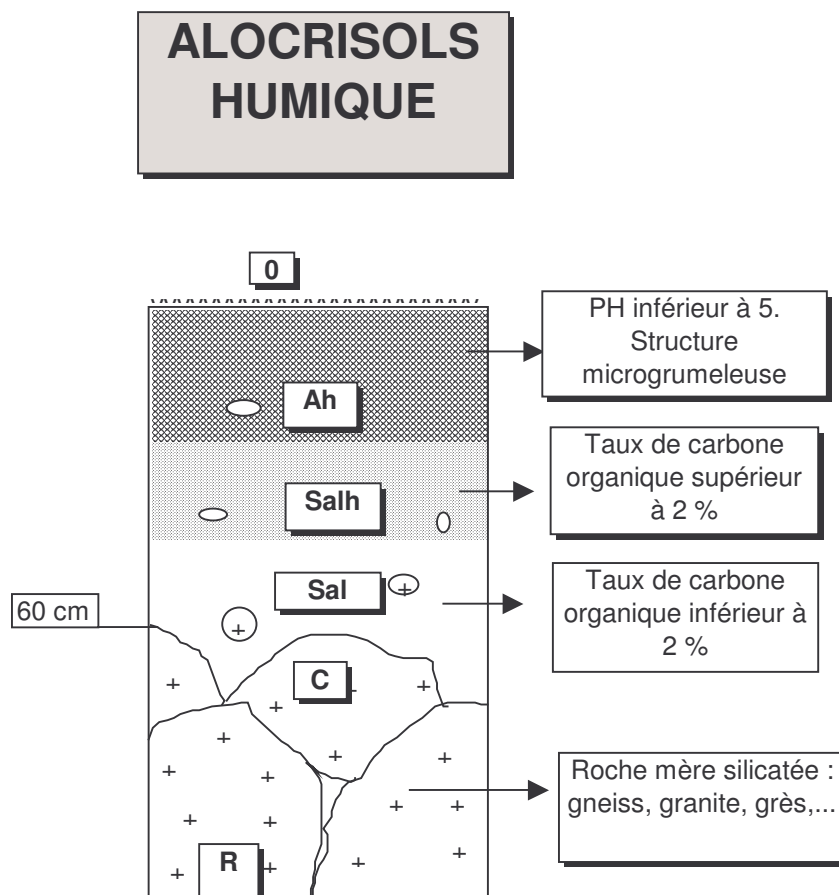


Figure 16 : Schéma type d'un ALOCRISOL HUMIQUE

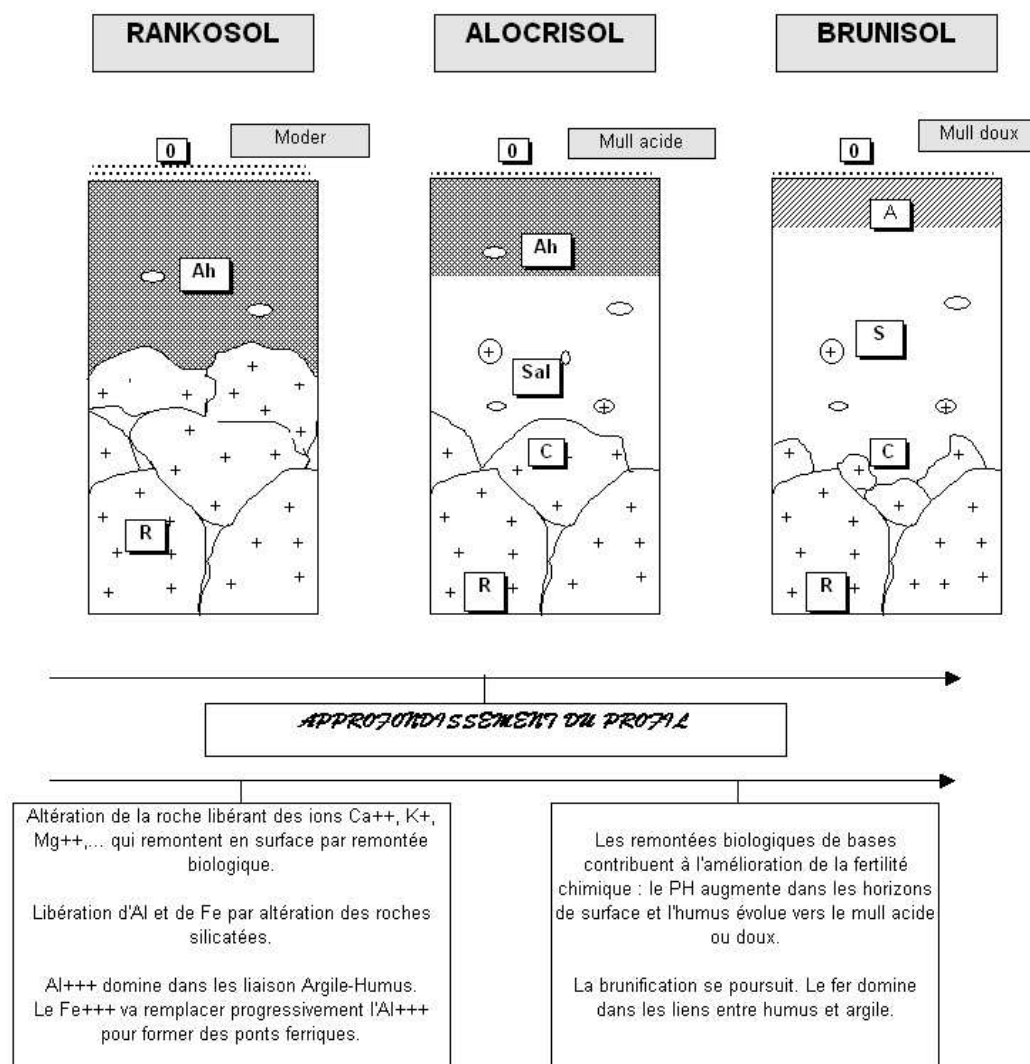
B) L'ALOCRISOL, étape intermédiaire dans l'évolution possible d'un RANKOSOL vers le BRUNISOL (figure 17) :

Le RANKOSOL d'érosion, sol jeune formé sur une roche cristalline mise à nu par l'érosion, nous donne une idée des sols jeunes qui se sont jadis installés sur les affleurements cristallins de plaine : la végétation pionnière qui colonise une telle roche produit un humus pauvre en azote et en bases, se liant difficilement au peu d'argile formée sur la roche désagrégée : un humus de type moder.

La transformation du moder en mull :

L'altération de la roche silicatée se poursuit et libère davantage de cations Ca^{++} , Mg^{++} , K^{+} , régulièrement concentrés en surface par remontée biologique. Ces bases permettent l'installation d'une végétation plus améliorante (plus riche en azote et en bases) qui stimule l'activité des microbes et lombrics : la décomposition des matières organiques et l'humification s'accroissent et l'humus se lie aux argiles pour former un complexe argilo-humique : le moder se transforme en mull, un mull encore acide de PH 4,5 à 5.

Figure 17 : Evolution possible du RANKOSOL AU BRUNISOL



La formation du « pont ferrique » :

L'altération des minéraux silicatés libère aussi de l'alumine et du fer sous forme d'hydroxydes et d'ions Al^{+++} et Fe^{+++} . Tant que le PH est très acide, ce sont surtout les ions Al^{+++} qui servent de « pont » entre argile et humus. Au fur et à mesure que se relève le PH grâce aux remontées biologiques de bases, les ions Fe^{+++} les remplacent, formant le « pont ferrique » (brunification). De plus, le fer participe à la formation du mull en insolubilisant les substances pré-humiques.

L'approfondissement du profil : la formation d'un horizon Sal

Avec l'altération des minéraux de la roche, le profil s'approfondit. Vient un moment où l'humus ne parvient plus à imprégner toute l'épaisseur du sol altéré : un horizon (Sal) non humifère coloré en brun par les oxydes de fer s'intercale entre la roche-mère et l'horizon hémiorganique A : le RANKOSOL s'est transformé en ALOCRISOL.

De l'ALOCRISOL au BRUNISOL :

Le profil s'approfondit encore et par le jeu des remontées biologiques de bases, le PH s'élève jusqu'à 5,5-6. Le mull acide fait place à un mull doux, le sol est devenu BRUNISOL.

C) Potentialités forestières :

Bien que la fertilité chimique des ALOCRISOLS soit moindre que celle des BRUNISOLS, ces sols gardent souvent de bonnes potentialités pour la production forestière des grandes essences résineuses (douglas, sapin pectiné, épicéa commun) ou feuillues (hêtre, chêne sessile, châtaigner) pour autant qu'elles ne soient pas trop exigeantes sur le plan minéral.

Leur potentialités dépendront des facteurs physiques suivants :

- profondeur prospectable ;
- importance de la réserve en eau et régime hydrique ;
- position topographique, exposition.

Ces sols étant acides, les ions toxiques Al^{+++} peuvent devenir toxiques

Concernant les sols les plus filtrants et les plus pauvres en base, le gestionnaire devra rester vigilant à une dégradation podzolique de ces sols qui peuvent se déclencher suite à la monoculture d'essences à litière acidifiante (épicéa commun, pin sylvestre, hêtre). Le mélange d'essences ou leur alternance au cours des révolutions en futaie régulière peuvent être des solutions intéressantes.

Rappelons par exemple que les bouleaux et sorbiers sont des essences particulièrement intéressantes afin d'améliorer la qualité de l'humus.

IV. LUVISOLS (Sols bruns lessivés et Sols lessivés, CPCS)

4.1. Généralités et horizons de référence :

Les LUVISOLS sont caractérisés par la présence dans le solum d'horizons présentant de nettes différences sur un plan morphologique:

A. L'horizon éluvial E (ou horizon de départ)

L' **horizon éluvial E** est un horizon minéral ou organo-minéral nettement appauvri en fer et/ou en argiles fines ($< 2 \mu\text{m}$). C'est un horizon d' éluviation par entraînement vertical, oblique ou latéral de ces constituants .

Les principales caractéristiques de l' horizon E sont les suivantes :

Il est, en général, proche de la surface du sol, sous un horizon A. Son épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres.

Il est appauvri, non seulement en minéraux argileux, mais aussi en sels, en carbonates, en hydroxydes (Fe, Al,...). En général, l'appauvrissement en sels et en carbonates a précédé l'appauvrissement en éléments argileux, l'appauvrissement en hydroxydes étant, le plus souvent, conjoint à celui en éléments argileux.

En conséquence des appauvrissements, les horizons E connaissent une concentration et donc un enrichissement relatif en constituants migrant moins facilement : limons, sables,...

Sa couleur est toujours plus claire que celle de l'horizon sous-jacent.

L'horizon E est beaucoup moins riche en carbone organique que l'horizon A sus-jacent.

B . L'horizon illuvial BT (ou horizon d'accumulation)

Les **horizons BT** (anciennement Bt avec t=ton qui veut dire argile en allemand) sont des **horizons enrichis en argiles illuviales**, une partie de l'enrichissement étant la conséquence d'une migration généralement verticale. En règle générale, un horizon E ou A est présent au-dessus d'eux dans le solum, mais il peut avoir été érodé et ne plus exister.

Lorsqu'il existe des agrégats (polyèdres, prismes ou cubes) dans l'horizon BT (anciennement Bt avec t=ton qui veut dire argile en allemand), on peut observer la présence de revêtements argileux (**appelés argilanes**) sur certaines surfaces : faces des agrégats, chenaux, canalicules. Toutefois, une observation microscopique est souvent nécessaire pour constater ce phénomène, témoin de la migration de l'argile.

Seront rattachés aux LUVISOLS les solums dont la nette différenciation morphologique (texturale surtout) résulte du **processus de LESSIVAGE** des argiles c'est-à-dire d'illuviation d'argiles. Cette différenciation s'avérant un **facteur prédominant**¹ dans leur comportement et fonctionnement.

Le lessivage des cations alcalins et alcalino-terreux (K, Mg, Ca) c'est-à-dire la **lixiviation** et la dynamique du fer et de l'aluminium sont des conditions importantes de l'évolution des LUVISOLS.

Le climat est un facteur important dans la formation des LUVISOLS, le climat atlantique étant plus profondément « lessivant » que le climat continental, mais un facteur déterminant de la rapidité et de l'intensité de la différenciation paraît être la nature de la roche-mère. Les plus favorables à l'argilluviation sous nos climats européens tempérés sont les matériaux sédimentaires meubles profonds, suffisamment filtrant (mais sans excès), non ou peu calcaire. Les plus caractéristiques sont les formations limoneuses, notamment éoliennes. La majorité des LUVISOLS sont des sols relativement épais.

¹Des déplacements d'argile peuvent être observés dans d'autres Références, mais dans ce cas, soit ils sont de faible importance, soit ils constituent un processus secondaire par rapport à un autre processus considéré comme dominant.

Figure 20 : exemple de NEOLUVISOL

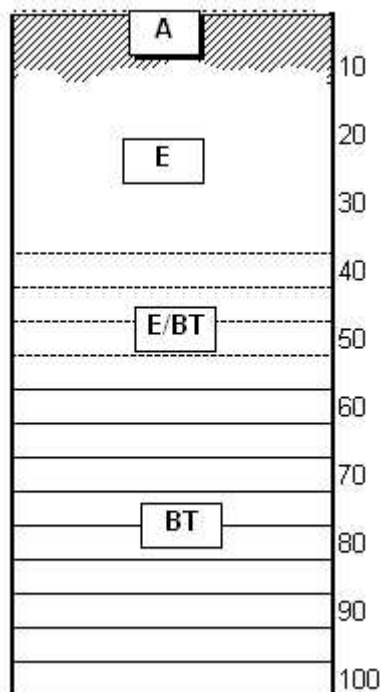
Date de description : 15 octobre 2005 (J-Y MASSENET)

Lieu : Massif de Croixdalle (Seine maritime) – parcelle 481

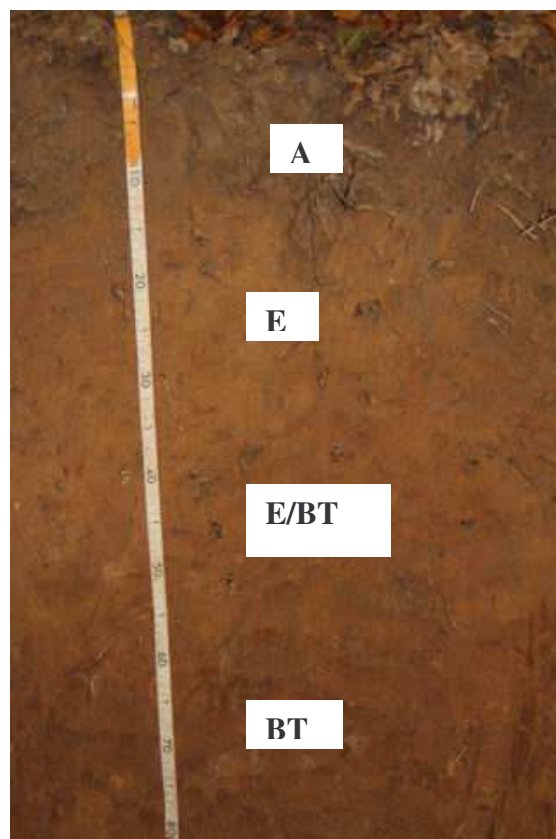
Situation topographique : milieu de versant

Géologie : limon à silex sur argile résiduelle à silex

Peuplement : perchis de hêtre



Voir photo sur le cd rom



Humus : Mésomull

A (0 - 12 cm) : frais - limon brun gris foncé (10 YR 5/3) - structure grumeleuse moyenne , nette - charge en éléments grossiers faible nulle - meuble - PH = 5 - Nombreuses racines très fines à grosses.

E (12 - 38 cm) : frais - limon brun jaune (10 YR 6/6 à 5/6) - structure polyédrique subanguleuse moyenne , nette - charge en éléments grossiers nulle - peu compact puis assez compact - PH = 5,5 - Racines fines et moyennes communes .

E / BT (38-55 cm) : horizon de transition -frais - limon argileux brun jaune à brun (10 YR 5/6 et 7,5 YR 5/6) - structure polyédrique subanguleuse moyenne , nette - charge en éléments grossiers nulle - assez compact - PH = 5,5 - Racines fines et moyennes communes

BT (55 - 95 cm) : frais - limon-argileux brun (7,5 YR 5/6 à 5/4) devenant ensuite argilo-limoneux - structure polyédrique anguleuse grossière - compact - Quelques petites plages de décolorations (5 %, 10 YR 7/4) - PH =5,5 à 6 - Racines fines et moyennes peu nombreuses

4.2 . REFERENCES :

Selon le mode et l'intensité du lessivage on retiendra, en ce qui nous concerne, 3 Références.

4.2.1. NEOLUVISOLS (Sols bruns lessivés, CPCS)

Ce sont les sols les plus caractéristiques **des limons épais récents** de nos régions, pour peu que ceux ci soit peu acides ou du moins encore riches en calcium en profondeur. Les forêts de plaine se développant sur ces sols sont des chênaies à charme ou des hêtraies-chênaies.

Ces sols subissent un **LESSIVAGE MECANIQUE** des argiles, celles-ci migrant avec le fer ferrique qui leur est associé (figure 22). Le PH est peu acide, généralement entre 5 et 6. L'humus sera donc souvent un mull doux ou peu acide.

A. Solum diagnostique (figure 21) :

A / E / BT / C

L'horizon E est modérément appauvri, encore assez coloré, assez bien structuré et aéré.

La transition entre E et BT est assez progressive :

- si la teneur en argile de E < 10 %, alors la teneur en argile de BT est au moins égale à celle de E + 3%.
- **si la teneur en argile de E est comprise entre 10 et 30 %, alors IDT doit être compris entre 1,3 et 1,8. L'IDT (Indice de Différenciation Texturale) est le rapport entre la teneur en argile maximale dans le BT et la teneur minimale dans l'horizon E.**
- si la teneur en argile de E > 30 %, alors la teneur en argile de BT est au moins égale à celle de E + 9 %.

Si l'IDT est inférieur à 1,3, le sol sera à raccrocher aux BRUNISOLS éluviques.

Un exemple de NEOLUVISOL est présenté à la figure 20.

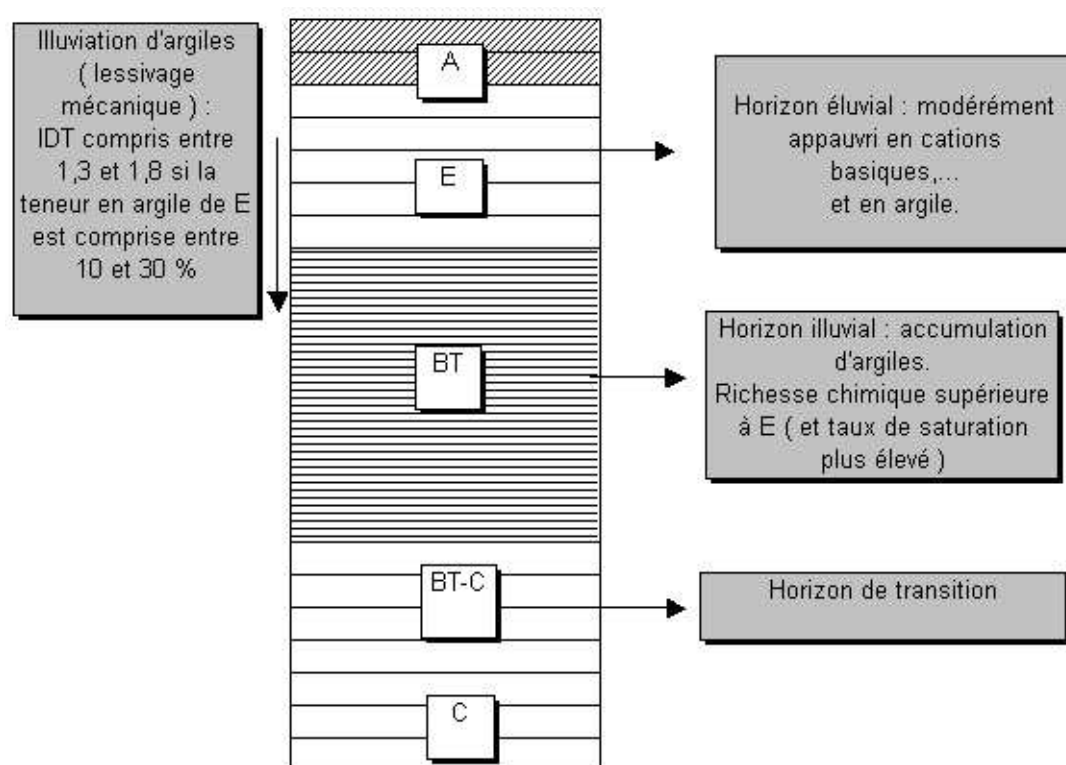


Figure 21 : schéma d'un NEOLUVISOL

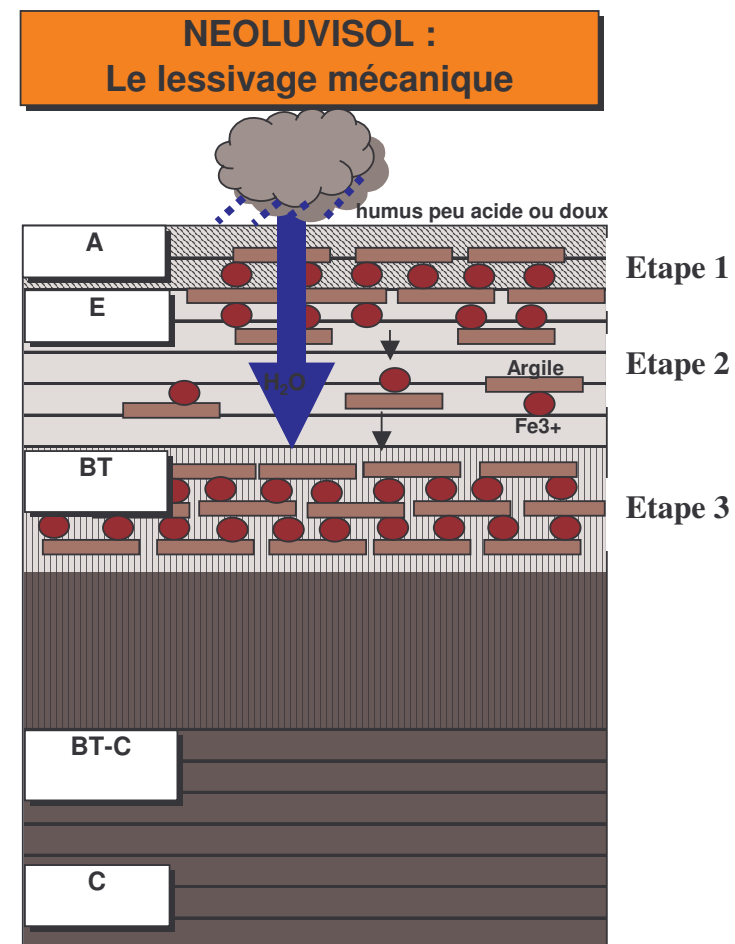


Figure 22 : Le lessivage mécanique

B. Pédogenèse :

Le **lessivage mécanique** des argiles peut s'expliquer comme suit sur les sols limoneux profonds (figure 22) :

Etape 1 (mobilisation) : Suite à la dissolution par l'eau de pluie des carbonates de calcium contenu à l'origine dans le limon loessique et au lessivage des ions calcium et magnésium (flocculants), on assiste à une diminution du PH de l'horizon A (< à 5,5 –6) et les agrégats qui forment la structure deviennent plus fragiles. Ainsi, **les argiles peuvent alors se disperser plus facilement.**

Etape 2 (transport) : Les argiles sont alors entraînées par l'eau de gravité qui circule dans les pores larges et canalicules. **Le fer ferrique reste cependant lié à l'argile lors de la migration.**

Etape 3 (dépôt) : Une fois arrivées dans l'horizon BT, les argiles s'y déposent, formant des revêtements (appelés argillanes ou plus précisément ferri-argillanes lorsque le fer reste lié à l'argile) notamment à la surface des agrégats ou le long des canalicules. Ces argillanes sont de couleur ocre et leur rapport fer/argile est toujours élevé, de l'ordre des 5% .

En savoir plus ?

Les argiles subissent-elles, au cours du lessivage mécanique, des transformations chimiques ?

Dans cette forme de lessivage, les argiles ne subissent aucune altération chimique. Les gains d'argile des horizons BT correspondent sensiblement aux pertes des horizons supérieurs. Les composés organiques solubles émanant des litières disparaissent vite (biodégradation rapide ou polymérisation en humines) et n'interviennent pas dans le lessivage mécanique (différence avec le lessivage acide).

Qu'est-ce qui détermine la profondeur d'apparition de l'horizon BT ?

Les particules d'argiles sont entraînées par l'eau de gravité et dépendent donc de la vitesse et de l'importance des flux d'eau (filets). La vitesse de descente des particules d'argiles reste cependant toujours inférieure à celle de l'eau. Ce qui détermine le dépôt des argiles est donc un ralentissement de ces flux d'eau et donc de l'énergie d'entraînement de ces particules.

La profondeur moyenne à laquelle ces derniers ralentissent peuvent correspondre avec le niveau de densité maximale des racines absorbantes. Ce sont donc alors les pluies d'été qui, à l'aide de la végétation , amorcent la formation des horizons BT. L'importance des précipitations et leur intensité influent également sur la profondeur atteinte par le front d'humectation et donc sur la profondeur de formation des dépôts argileux.

Un autre facteur qui peut provoquer le dépôts des particules d'argiles est la floculation lors de l'arrivée des particules dans une zone où la concentration en bases (Ca, Mg) est plus élevée.

Ensuite que se passe t-il ?

La formation de l'horizon BT commencée, les dépôts d'argiles (argilanes), commencent à provoquer une diminution de la porosité. Ceci va provoquer un ralentissement progressif de la percolation des pluies d'hiver et donc à nouveau des dépôts d'argiles.
De plus, la saturation par l'eau capillaire de l'horizon BT en hiver arrête efficacement les courants descendants ; seules les argiles très fines pouvant être entraînées à un niveau inférieur.

C. Propriétés physiques :

La **porosité est élevée** dans les horizons A et E. Il en va souvent de même pour l'horizon BT qui reste **alors bien aéré et bien colonisé** par les racines.

L'hydromorphie reste, lorsqu'elle existe dans l'horizon BT, de faible intensité.

Les NEOLUVISOLS étant généralement **profonds** possèdent souvent des **réserves utiles en eau élevées**.

La forte proportion de limons de ces sols peut les rendre **sensibles à la battance et au tassement des horizons superficiels**.

En ce qui concerne la circulation des engins, il conviendra donc au forestier d'adopter les mesures adaptées :

- interdiction de circulation en période humide ;
- utilisation de pneumatiques basse pressions ;
- respect des cloisonnements.

D. Propriétés chimiques :

Le taux de saturation en bases est le plus élevés dans les horizons A et BT (voir exemple à la figure 23). Il est souvent voisin de 50 - 60 % en A et descend parfois jusqu'à 25 % en E. Il remonte ensuite à plus de 75-80 % dans l'horizon BT.

Il n'y a pratiquement pas d' Al^{3+} échangeable, excepté parfois dans l'horizon E.

Les cycles de l'azote et du phosphore sont rapides.

La richesse chimique des NEOLUVISOL est bonne à excellente pour la forêt.

Horizon	Argile %	Limons fins %	Limons grossiers %	Sables fins %	Sables grossiers %
A					
E	22,9	23,4	42,6	8,7	1,4
BT	30,1	20,4	41,6	6,8	1,1
BT-C	24,8	22,5	45,4	6,1	1,2
II C	21,3	21,4	41,7	5,8	1,1

Horizon d'accumulation
d'argile

Appauvrissement
modéré en argile

I.D.T. = 1,3 compris entre 1,3 et 1,8.

**PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE
L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

NEOLUVISOL

Horizon	Profondeur (cm)	Mat. Org. %	C %	N %	C/N	PH	Ca (meq/ 100 g)	Mg (meq / 100 g)	K (meq/ 100 g)	T (meq / 100 g)	S / T %
A	0-5	3,6	2,11	0,164	13	4,9	6,3	1,32	0,481	12,3	65,9
E	20-30	1,3	0,78	0,063	12	5,0	7,1	1,5	0,25	12,6	70,2
BT	50-60	0,5	0,3	0,039	8	5,7	13,3	1,83	0,212	14,4	sat.
BT-C	75-85					6,3	13,6	1,15	0,155	12,8	sat.
C	100-110					8,0	34,7	0,88	0,136	10,4	sat.

**ANALYSE CHIMIQUE D'UN
NEOLUVISOL**

Figure 23 : Analyse granulométrique et analyse chimique d'un NEOLUVISOL : exemple

4.2.2. LUVISOLS TYPIQUES (Sols lessivés, CPCS)

Dans ces sols, au lessivage mécanique succède un **LESSIVAGE ACIDE**, mettant en jeu :

- une acidification plus accentuée (PH de 4-4,5 à 5 généralement) ;
- une évolution de l'humus vers des mull acides du type dysmull ou des moders, avec formations d'acides organiques² aptes à complexer le fer, donc à dissocier le complexe argile-fer-humus. Mais ces complexes sont encore peu agressifs car peu abondants ;
- une diminution de l'aération au moins saisonnière, permettant la réduction du fer. Cette diminution provient de la destruction de la structure due à l'acidification du milieu.

En profondeur, les acides organiques se condensent en acides fulviques de couleur claire. Ils ne teintent donc pas l'horizon BT en noir comme ils le feront dans les PODZOSOLS.

L'horizon BT continue à s'enrichir en argiles (l'I.D.T est supérieur à 1,8) et en fer provenant de l'horizon E.

A. Solum diagnostique (figure 25) :

A / E / BT / C

L'horizon E est nettement appauvri en argile et en fer. Il est décoloré, peu structuré ou à structure instable.

La transition entre E et BT est nette :

- si la teneur en argile de E < 10 %, alors la teneur en argile de BT est au moins égale à celle de E + 8 %.
- **si la teneur en argile de E est comprise entre 10 et 30 %, alors IDT doit être supérieur à 1,8. L'IDT (Indice de Différenciation Texturale) est le rapport entre la teneur en argile maximale dans le BT et la teneur minimale dans l'horizon E.**
- si la teneur en argile de E > 30 %, alors la teneur en argile de BT est au moins égale à celle de E + 24 %.

Un exemple de LUVISOL typique est exposé en figure 24 tandis qu' un exemple d'analyses chimiques et granulométriques est présenté en figure 26.

La présence fréquente, dans l'horizon BT ou E, de signes d'hydromophies temporaires (« taches de rouille », concrétions Fe-Mn de couleur noire,...) peuvent justifier le codage BTg ou Eg.

²Alors qu'à PH neutre ou peu acide, la matière organique, vite transformée en humus, a un rôle stabilisateur envers la structure, lorsque le sol s'acidifie la matière organique devient agressive et agent de destruction du complexe argile-fer-humus. Ce rôle s'accroîtra dans la podzolisation, où les acides organiques non seulement dissocient ce complexe argilo-humique, mais détruiront les feuillets d'argiles eux-mêmes.

Figure 24 : exemple de LUVISOL typique

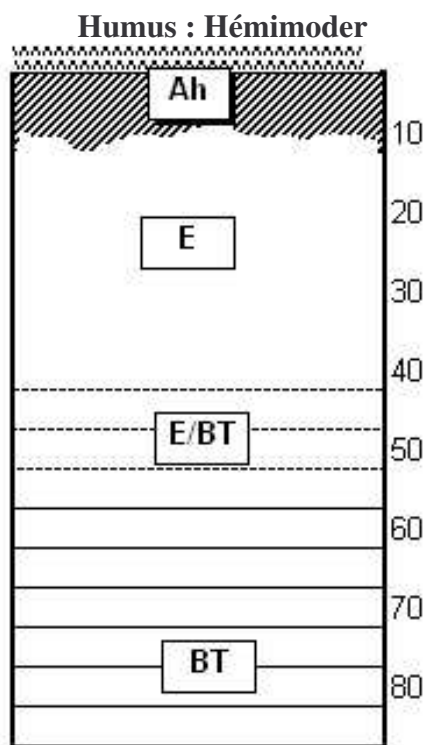
Date de description : octobre 2005 (J-Y MASSENET)

Lieu : Massif du Croc (Seine maritime) – parcelle 35

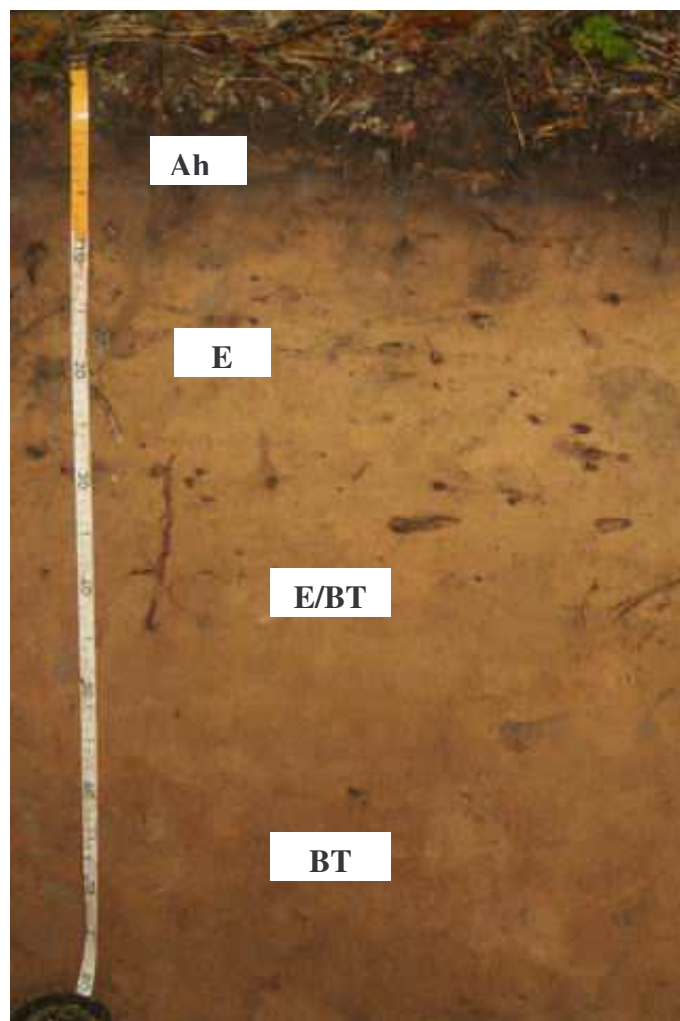
Situation topographique : plateau

Substrat : limon sableux

Peuplement : pin sylvestre



Voir photo sur le cd rom



A (0 - 7 cm) : frais - limon brun gris foncé (10 YR 3/3 puis 4/4) - structure polyédrique subanguleuse moyenne , nette - charge en éléments grossiers nulle - meuble - PH = 4,5 - Nombreuses racines très fines à grosses.

E (7 - 40 cm) : frais - limon jaune brun (10 YR 6/8) - structure polyédrique subanguleuse moyenne , nette - charge en éléments grossiers nulle - meuble à peu compact - PH = 4,5 - Racines très fines et moyennes communes .

E/BT (40 - 60 cm) : frais - limon argileux brun jaune à brun (10 YR 5/8 et 7,5 YR 5/8) - structure polyédrique subanguleuse moyenne , nette - charge en éléments grossiers nulle - assez compact - PH = 5 - Racines fines et moyennes communes .

BT(60 - 85 cm) : frais - limon argileux brun jaune rougeâtre (7,5 YR 7/6) - structure polyédrique subanguleuse moyenne , nette - charge en éléments grossiers nulle - compact - quelques plages de décoloration (10 YR 6/4 , <10 %) - PH = 5 - Racines fines et moyennes peu nombreuses

Figure 24bis : exemple de LUVISOL typique

Date de description : 29-6- 2004 (J-Y MASSENET)

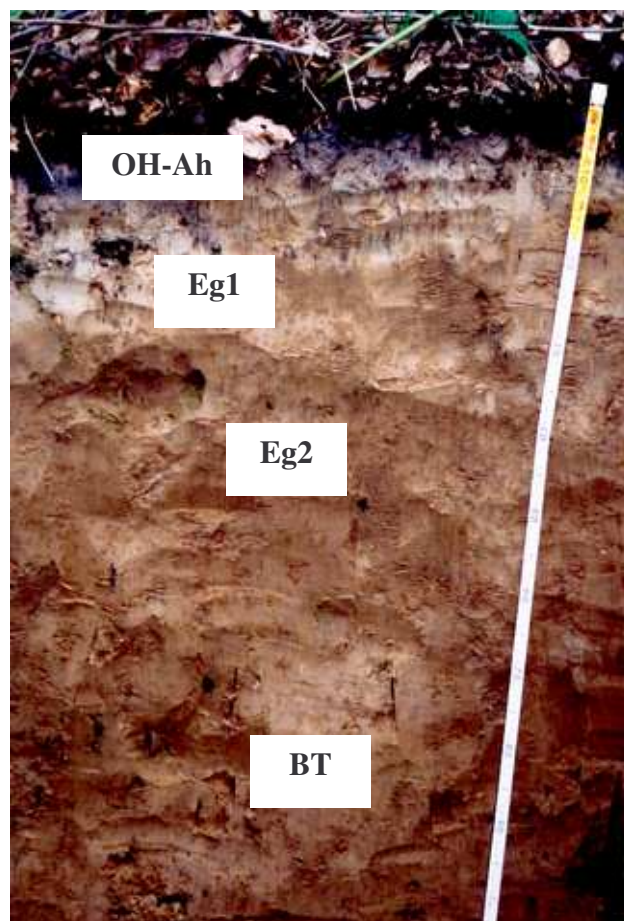
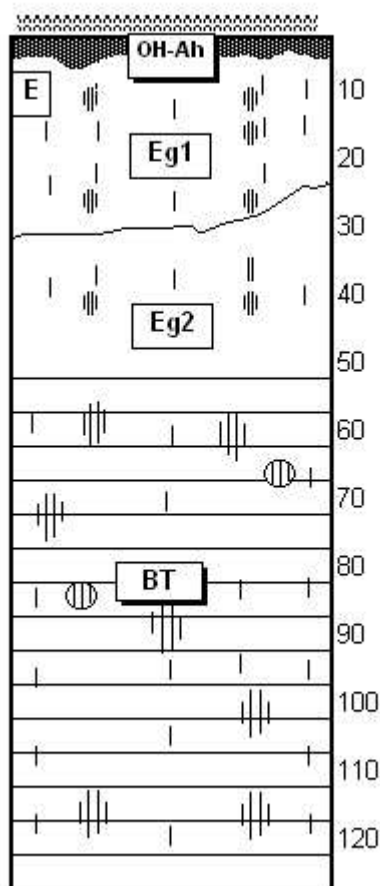
Lieu : Massif d'Eawy (Seine maritime) – parcelle 90

Situation topographique : plateau

Substrat : limons éoliens

Peuplement : futaie régulière adulte de hêtre

Humus : Eumoder



Voir photo sur le cd rom

OH-Ah (0 - 5 cm) : frais - limon brun gris foncé (10 YR 4/2) - structure polyédrique subanguleuse moyenne peu nette, parfois continue (tassement) - meuble, localement tassé avec traces d'hydromorphie et de décoloration - PH = 4.5 - Nombreuses racines très fines à moyennes. Transition nette. légèrement ondulée.

Eg 1 (5- 33cm) : frais - limon brun jaune (10 YR 5/6) - structure polyédrique subanguleuse peu nette, parfois structure continue (tassement) - assez compact - horizon tassé - taches de rouille (5YR5/8) et de décoloration (10 YR 6/4) -PH = 4.5 . Transition peu nette.

Eg2 (33- 45cm) : frais - limon brun jaune (10 YR 5/6) à brun - structure polyédrique subanguleuse moyenne, peu nette- peu compact -taches de rouille (5YR5/8) peu nombreuses et taches de décoloration (10 YR 6/4) moins larges que dans Eg1- PH =4,5- 5 - Racines de toutes tailles fines communes, à distribution assez régulière.

BTg (43-67 cm): frais - limon-argileux brun- (7,5 YR 5/6 à 5/4) - structure polyédrique anguleuse moyenne à grossière, assez nette - compact - présence de quelques concrétions fer-manganèse - présence de graviers de silex (1 - 5 %) - rares taches de rouille (7,5 YR 5/8) (1 à 5 %) - zones de décoloration (10 YR 7/4 à 7/8) (5 - 10 %)- Présences de revêtements argileux (7,5 YR 4/4) - PH =5 - Racines fines rares.

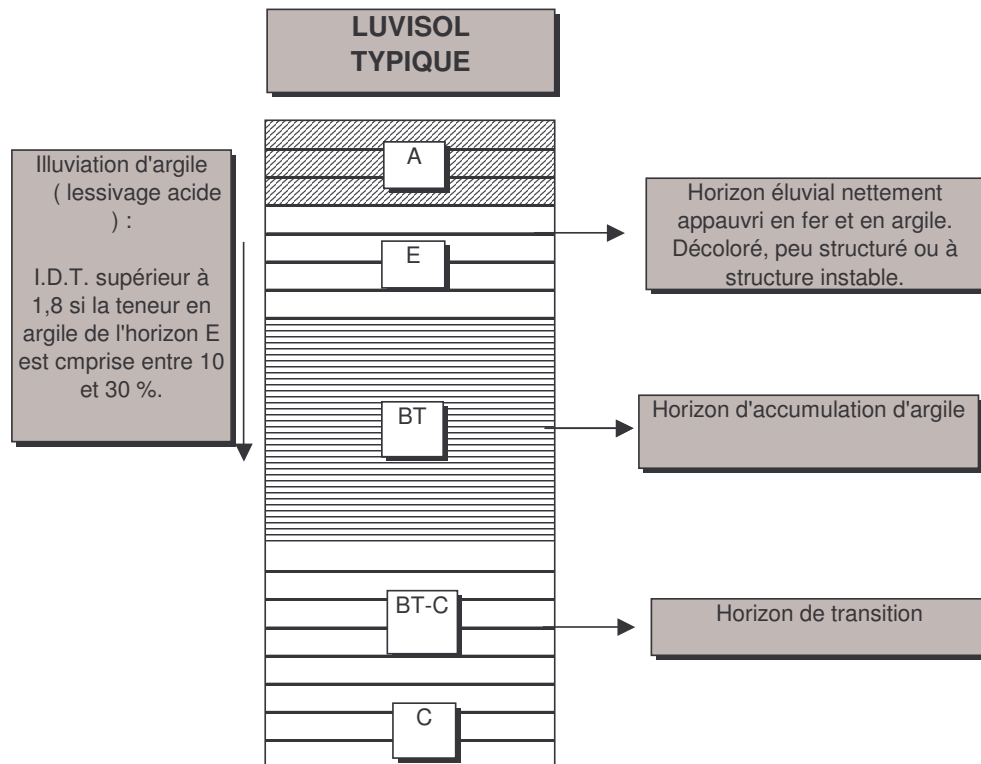


Figure 25 : schéma d'un LUVISOL typique

B. Pédogenèse :

Ces sols sont caractérisés par le mécanisme du **lessivage acide** qui succède au lessivage mécanique après disparition des réserves calciques profondes et acidification du milieu. Ce processus met en jeu plusieurs phénomènes (figure 27):

1. Alors qu'à PH neutre ou peu acide, la matière organique fraîche est très vite transformée en matières humiques favorables à la formation d'agrégats stables, il n'en est plus de même en milieu acide (PH de 4 à 5).
En effet, **les acides organiques solubles** libérés par la décomposition des matières organiques fraîches se polymérisent moins vite et, par leur "agressivité", vont devenir des **agents de destruction des complexes argilo-humiques (destruction des liens entre argile-fer-humus)**.
La **séparation du fer et de l'argile** se fait quant à elle à la suite de la réduction de ce dernier. Une **diminution de l'aération**, au moins saisonnière (en période humide ou suite à un tassement de l'horizon A dû à un affaiblissement de la structure ou au passage d'engins lourds), permet cette **réduction du fer**.
Les acides organiques solubles interviennent comme agent de réduction.

2. Différence importante avec le lessivage mécanique : ici la **migration du fer et de l'argile se fait séparément**. Le fer, sous forme réduite, migrant sous forme de **complexe fer-acide organique**.

3. La forme d'accumulation des deux éléments (fer et argile) révèle bien la migration séparée : **le fer forme des taches de rouille** localisées, voire de petites concrétions ; **l'argile constitue des argilanes (revêtements) décolorés**, notamment à la surface des agrégats, dans lesquelles le rapport fer/argile est voisin de 1 % au lieu des 5 % des ferri-argilanes (NEOLUVISOLS).

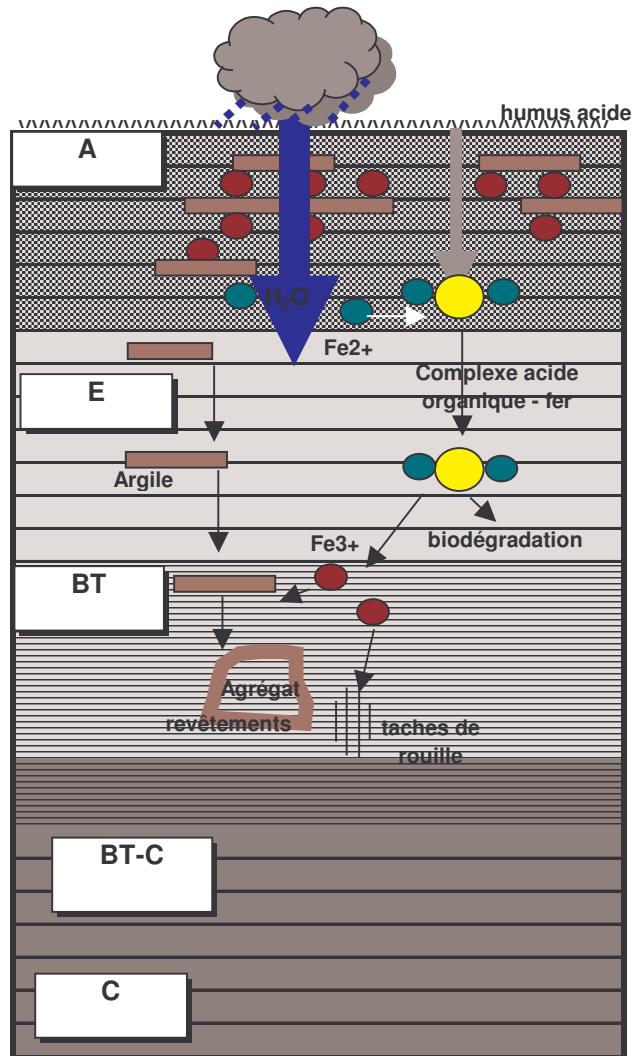


Figure 27 : pédogenèse d'un LUVISOL typique

En savoir plus ?

Que deviennent les acides organiques solubles dans l'horizon BT ?

On a vu précédemment que les acides organiques solubles émanant de l'horizon A jouaient un rôle important dans le lessivage acide, à la fois comme agent dispersant des argiles et comme agent de réduction et de complexation du fer. Toutefois, cette action est momentanée car ces acides ont une durée d'action courte. En effet dès que le sol se ressuie et s'aère de nouveau, ces substances sont rapidement biodégradées (il n'en sera pas de même dans les PODZOSOLS) . La faible quantité de matière organique qui existe en BT en est la preuve.

Les argiles subissent-elles des transformations ?

Dans les NEOLUVISOLS, les argiles dominantes sont des argiles micacées (illites), parfois ouverte (vermiculites) mais sans aluminisation marquée. Les argiles les plus fines (montmorillonites) sont lessivées de façon préférentielles et constitue l'essentiel des revêtements en BT. La capacité d'échange de ces argiles est élevée.

Par contre dans les LUVISOLS TYPIQUES, les argiles montrent un début de dégradation par aluminisation (figure 30). Les vermiculites-Al et chlorites-Al dominant, les montmorillonites vraies tendent à disparaître de la partie supérieure du profil et même au sein des revêtements de BT.

C. Propriétés physiques :

La **porosité** de l'horizon BT s'abaisse fortement par rapport aux NEOLUVISOLS et peu atteindre 30 %. L'hydromorphie peut devenir conséquente et donner lieu à l'apparition de pseudogleys (LUVISOLS-REDOXISOLS). La colonisation par les racines peut donc être fortement entravées dans l'horizon BT, par le manque d'aération et la plus forte compacité.

Les LUVISOLS étant généralement **profonds** possèdent souvent des **réserves utiles en eau élevées**.

La forte proportion de limons de ces sols peut les rendre **sensibles à la battance et au tassement des horizons superficiels**.

En ce qui concerne la circulation des engins, il conviendra donc au forestier d'adopter les mesures adaptées :

- ❑ interdiction de circulation en période humide ;
 - ❑ utilisation de pneumatiques basse pressions ;
- respect des cloisonnements.

D. Propriétés chimiques :

Le **taux de saturation en bases** est partout **inférieur à celui observé dans les NEOLUVISOLS. Idem pour la C.E.C.**

L'**acidité du profil est beaucoup plus accentuée** : le taux d'Al 3+ échangeable peut atteindre dans l'horizon E, 35 % de la C.E.C.

Les cycles de l'azote et du phosphore sont ralentis.

Les **argiles manifestent un début de dégradation** par aluminisation (figure 30). La dégradation des argiles se traduit par l'augmentation du rapport Al libre/argile, qui passe de 0,6% dans les NEOLUVISOLS à 1-2% dans les LUVISOLS typiques

Horizon	Argile %	Limons fins %	Limons grossiers %	Sables fins %	Sables grossiers %
A	11,2	24,3	46,3	17,4	0,8
E	9,8	22,1	58,2	8,9	1,0
BT	25,1	17,6	50,7	5,8	0,8
BT-C	14,2	15,1	54,8	15,3	0,6

Horizon
d'accumulation
d'argile

Appauvrissement
net en argile

I.D.T. = 2,56,
supérieur à 1,8

**PRINCIPALES
CARACTERISTIQUES DE
L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

LUVISOL TYPIQUE

Horizon	Profondeur (cm)	Mat. Org. %	C %	N %	C/N	PH	Ca (meq/ 100 g)	Mg (meq / 100 g)	K (meq/ 100 g)	T (meq / 100 g)	S / T %
A	0-4	7,4	4,32	0,284	15	4,8	3,6	0,81	0,481	11,4	42,9
E	20-30	0,8	0,48	0,038	13	4,3	0,1	0,04	0,06	4,5	4,4
BT	60-70					4,9	3,3	2,17	0,206	11,3	50,2
BT-C	110-120					5	3,4	1,2	0,124	7,4	63,8

**PRINCIPALES CARACTERISTIQUES
DE L'ANALYSE CHIMIQUE**

LUVISOL TYPIQUE

PH inférieur à 5.
Horizon E
généralement le plus
acide.

Horizon E nettement
appauvri en cations
basiques

Taux de
saturation très
faible

Figure 26 : Analyse granulométrique et analyse chimique d'un LUVISOL typique : exemple

4.2.3. LUVISOLS DEGRADES (Sols lessivés glossiques, CPCS)

A.Généralités :

Ces sols constituent un stade de dégradation plus avancé des solums brunifiés : la dégradation hydromorphe.

Le processus de dégradation hydromorphe peut s'expliquer de la façon suivante : dans l'horizon BT très argileux, se forment en saison sèche des fentes de retrait qui, par la suite sont des zones de drainage préférentiel. L'eau acide y stagne l'hiver, y provoquant une destruction des argiles par complexolyse (les acides organiques agressifs peuvent complexer l'argile), puis l'élimination complète du fer. le profil présente alors des langues ou glosses ou langues de décoloration (presque blanches) et bordées de concrétions rouilles.

Toutefois, il faut savoir qu'il existe une deuxième origine possible en ce qui concerne la formation des glosses : il s'agit d'une origine périglaciaire (datant du Würm, dernière période glaciaire en date). Seront concernés par cette deuxième modalité de formation, les LUVISOLS DEGRADES à fragipan issus de limons anciens.

B.Solum diagnostique :

A / E / Eg / BTgd / C

où BT gd est un horizon BT dégradé et présentant des signes d'hydromorphie (taches de rouille) temporaires.

L'horizon E donc est fortement décoloré, particulièrement au contact de l'horizon BT ainsi qu'au sein des langues de décolorations qui pénètrent ce BT. L'horizon E est au moins partiellement albique (blanchi) et la présence de concrétions rouilles d'oxydes ferriques explique le codage –g.

L'horizon BT peut aussi présenter dans sa matrice des taches de décolorations qui sont le signes de dégradations diffuses.

L'IDT est supérieur à 1,8.

Deux exemples de LUVISOLS dégradés sont présentés aux figures 29 et 29bis.

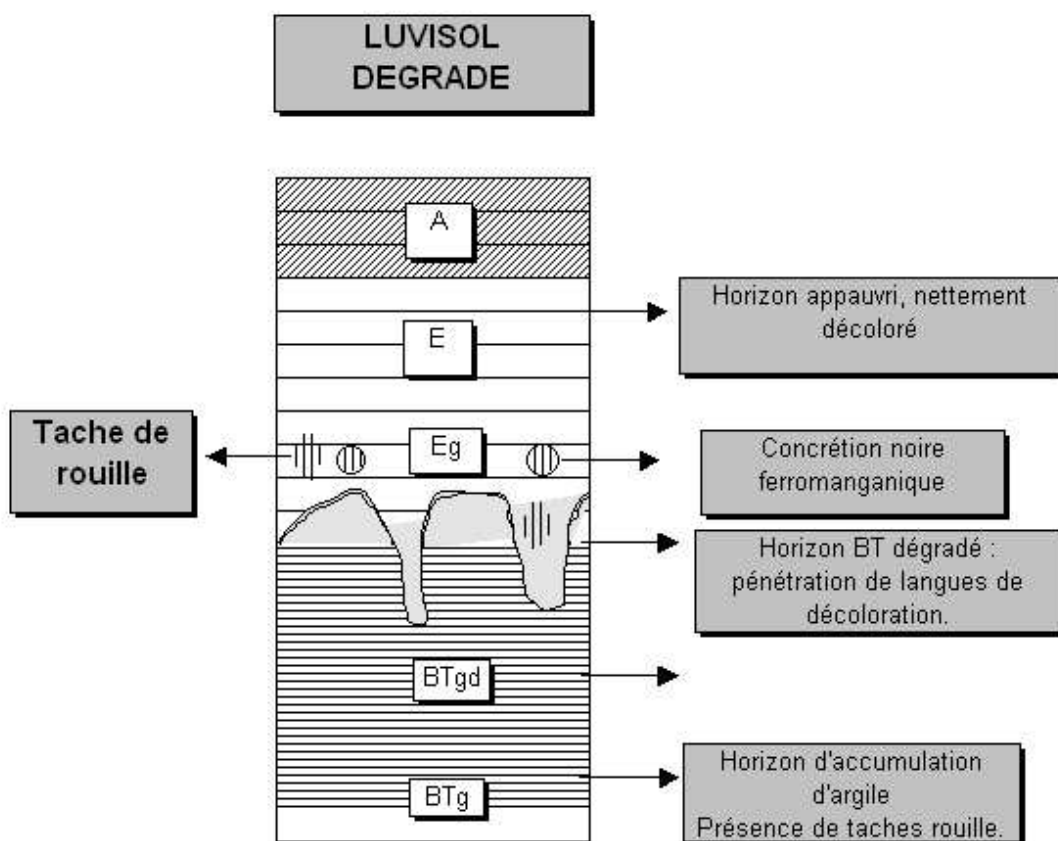


Figure 28 : schéma d'un LUVISOL dégradé

La dégradation de l'horizon BT :

La dégradation de l'horizon BT se produit à partir du haut de l'horizon et le long des conduits perméables (espaces entre les agrégats, pores, ...). Les eaux acides qui circulent à ces endroits contribuent à dégrader les argiles et à entraîner le fer (après réduction et complexation par les acides organiques). Les racines contribuent également à dégrader les argiles en produisant des acides (notamment de l'acide carbonique) et en prélevant de l'oxygène, créant ou renforçant localement des conditions réductrices.

Les eaux de percolations acides circulant préférentiellement le long des fentes et entre les agrégats, rendent à ces endroits les conditions de lessivage des argiles encore plus intense, augmentant ainsi leur translocation vers le bas du profil.

La nappe perchée qui se forme en hiver au dessus de l'horizon BT crée les conditions favorables à la migration et à la dégradation des minéraux argileux : en effet l'acidité de l'eau (PH voisin de 4) conduit à la transformation des argiles en chlorites alumineuses (voir figure 30) et les conditions réductrices permettent la réduction puis la solubilisation et l'entraînement du fer.

Les conditions de réduction permettent au fer et au manganèse de migrer depuis les conduits (espaces entre les agrégats, fentes, langues, ...) vers l'intérieur des agrégats, où les conditions oxydantes (de l'oxygène restent à l'intérieur des agrégats même en période d'engorgement hivernal où la nappe perchée est présente) conduisent à la formation par précipitations de concrétions de fer ou ferromanganiques.

Lorsque les conditions de réduction disparaissent, le fer (Fe^{2+}) et le manganèse (Mn^{2+}) peuvent également se réoxyder le long des fentes, entre les agrégats et le long des langues de décoloration de l'horizon BT, ou dans la partie inférieure de l'horizon E. Des concrétions rouilles de Fe^{3+} ou des nodules noirs ferromanganiques Fe-Mn s'y forment ainsi.

Aux niveaux des revêtements argileux dans l'horizons BT (argilanes), ceux ci disparaissent progressivement depuis la partie supérieure du BT au fur et à mesure que la dégradation progresse. Dans les stades de dégradation peu avancée, on peut encore observer de façon isolée des rémanents d'argilanes sur les faces de quelques agrégats situés dans la partie inférieure de l'horizon E. Les particules d'argiles qui les compose sont en effet remobilisées et lessivées plus bas dans l'horizon BT. A l'extrême, dans les stades avancés de dégradation, tous les argilanes ont disparus dans une grande partie voire de la totalité de l'horizon BT.

Finalement, la dégradation des LUVISOLS se marque par différents aspects :

** **Aspect morphologique** : suite au départ et à la dégradation des argiles, nette concentration relative dans le E et dans les langues s'insinuant au sein de la partie supérieure du BT (= glosses) de matériaux siliceux de la taille des limons ou des sables ;*

** **Aspect géochimique** : dissociation du fer et des argiles, d'où des dynamiques et des redistributions au sein du sol indépendantes ;*

** **Aspect minéralogique** : transformation des argiles de type 2/1 et aluminisation conduisant à la formation de vermiculites et de chlorites alumineuses (figure 30)*

C. Propriétés physico-chimiques :

L'acidité du profil est encore plus accentuée que dans les LUVISOLS TYPIQUES.

La dégradation des argiles dans l'horizon E et même dans BT se poursuit et se traduit par l'augmentation du rapport Al libre/argile, qui passe de 0,6% dans les NEOLUVISOLS à 1-2% dans les LUVISOLS TYPIQUES, à plus de 2 % dans les LUVISOLS DEGRADES.

Al³⁺ est présent en abondance à tous les niveaux et il devient le cation dominant, l'emportant nettement, au moins dans l'horizon E, sur les bases échangeables.

Les argiles sont non seulement lessivées de l'horizon E mais elles sont également dégradées. L'horizon E se décolore suite au départ des argiles et du fer qui est réduit puis entraînés par l'eau de gravité. La CEC et la richesse chimique de cet horizon sont réduites. La structure est également fragile.

Les LUVISOLS dégradés possèdent donc les contraintes suivantes :

- présence d'une nappe perchée d'eau temporaire ;
- grande acidité de l'horizon E ;
- une certaine pauvreté chimique en fonction du stade de dégradation ;
- une structure fragile .

La forte proportion de limons de ces sols peut les rendre **sensibles à la battance et au tassement des horizons superficiels** (voir recommandations de gestions faites pour les LUVISOLS typiques). On évitera également l'emploi de monoculture de résineux à litière acidifiante et enracinement peu profond qui pourraient accélérer la dégradation de ces sols notamment par podzolisation (voir ci-dessous) des horizons de surface.

Figure 29 : exemple de LUVISOL dégradé

Date de description : 29-6- 2004 (J-Y MASSENET)

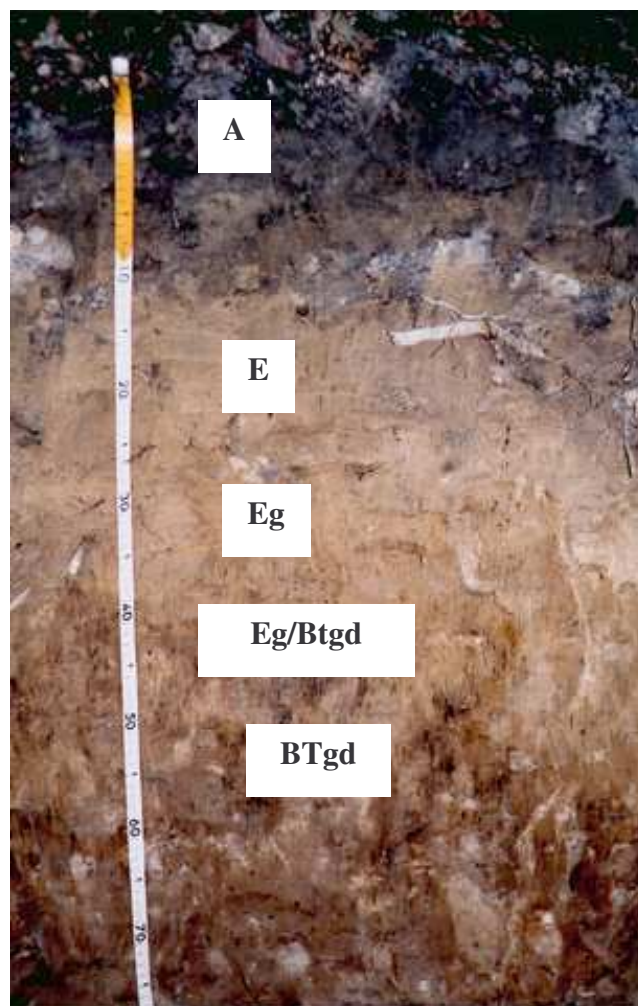
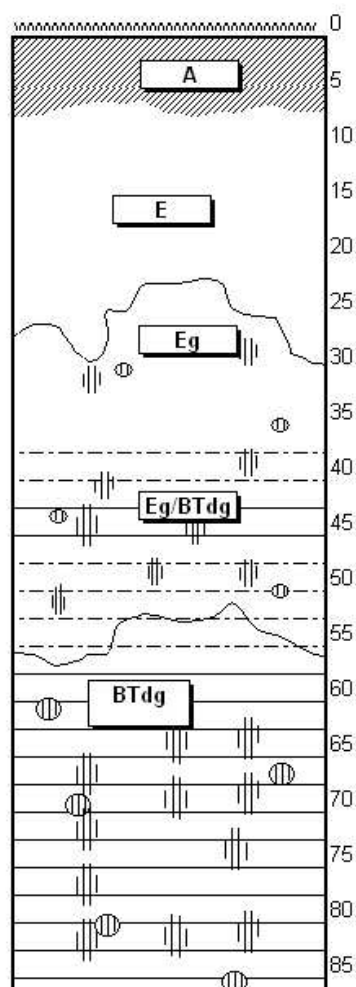
Lieu : Forêt de Retz (Aisne) – parcelle 742

Situation topographique : plateau

Substrat : limons loessiques

Peuplement : jeune futaie régulière de hêtre

Humus : hémimoder



Voir photo sur le cd rom

A (0- 8cm) : sec - limon peu sableux, brun (7,5 YR 5/2) - charge en éléments grossiers nulle - structure polyédrique subangulaire, nette - meuble à peu compact - racines très fines à fines nombreuses - PH = 4,5. Limite inférieure nette.

E (8 - 25/30cm) : assez sec - limon peu sableux , brun-jaune (10 YR 6/6) - charge en éléments grossiers nulle - structure polyédrique subangulaire nette moyenne à grossière - peu compact - racines très fines à grosses communes - PH = 5. Limite inférieure ondulée.

Eg (25/30 - 35/40cm) : assez sec- limon peu sableux , brun-jaune (10 YR 6/6) - charge en éléments grossiers nulle - structure polyédrique subangulaire nette moyenne à grossière - assez compact - 5 à 10% de taches rouilles fines (7,5 YR 6/8) et de fer-manganèse - Racines fines à moyennes peu nombreuses - PH = 5. Limite inférieure peu nette.

Eg/BTgd (35/40 - 50/60cm) : frais - limono-argileux , brun-jaune (10 YR 6/6) - structure polyédrique anguleuse grossière très nette - 10-20% de taches rouilles (7,5 YR 6/8 à 5/8 et 10 YR6/8) et 5-10% de plages décolorées (10YR 7/ 2) - Quelques concrétions de Fe-Mn - compact - racines très fines à moyennes très peu nombreuses - PH = 5,5. Limite inférieure légèrement ondulée, nette.

BTg d(50/60 - 80 cm) : frais - argilo-limoneux , brun - jaune (7,5 YR 6/6) - structure polyédrique anguleuse grossière très nette - 50% de plages rouilles (7,5 YR 6/8 à 5/8 et 10 YR6/8) et 15-20% de plages décolorées (10YR 7/ 2 à 7/3) - Concrétions de Fe-Mn, plus larges et plus nombreuses qu'en Eg/BT - très compact - racines fines à moyennes rares - PH = 5,5.

Figure 29bis : exemple de LUVISOL dégradé

Date de description : 31-3-1967 (INRA Laon)

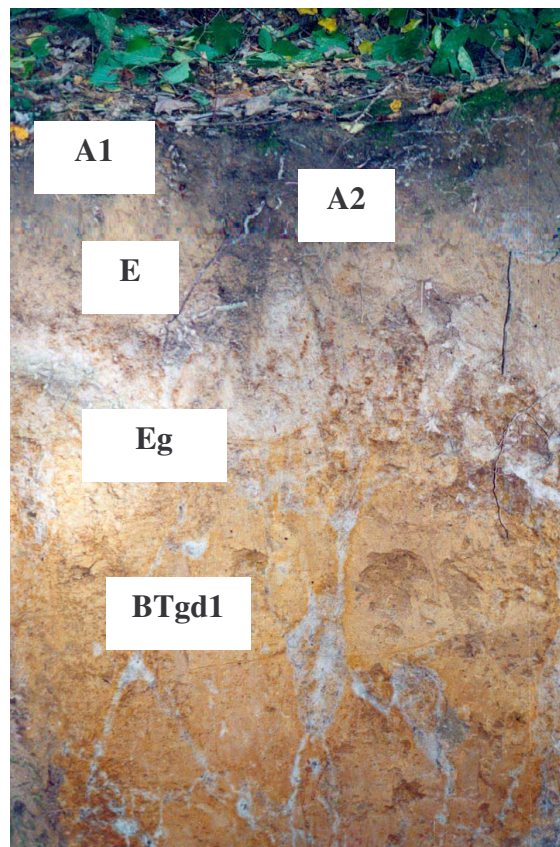
Lieu : Forêt de St Gobain (Aisne) – Le Pommelottier

Situation topographique : plateau

Substrat : limons sableux anciens

Peuplement : futaie régulière adulte de hêtre et chênes

Humus : hémimoder



A1 (0-4/6 cm) : Limon moyen légèrement sableux - brun gris très foncé et brun très foncé (10 YR3/2 et 3/3) - frais - forte teneur en matière organique - assez bonne colonisation par les racines moyennes et petites - petits silex rares - structure polyédrique subangulaire fine, modérément développée - friable. Limite nette et régulière

A2 (4/6 - 10/15 cm) : Limon moyen sableux - brun gris foncé et brun foncé (10 YR4/2 et 3/3) - frais - assez forte teneur en matière organique - bonne colonisation par les racines moyennes et petites, quelques grosses racines - rares cailloux éclatés, traces de charbon de bois - structure polyédrique subangulaire fine à très fine, faiblement développée - friable. Limite distincte et ondulée.

E (10/15- 19/26 cm) : Limon moyen sableux - brun jaune (10 YR5/6) - frais - infiltration de matière organique localement dans les galeries d'animaux fouisseurs - faible colonisation par les petites racines - quelques concrétions ferro-manganiques à la base de l'horizon, de 2mm à 1 cm, peu indurées, ocre rouge (5YR4/8) ; recouvrement de 1 à 3 % - 2 % de plages réduites gris pâle (10 YR 7/1) - structure polyédrique subangulaire fine à très fine, très faiblement développée - meuble. Limite distincte et irrégulière. langues descendant jusqu'à 32 cm.

Voir photo sur le cd rom

Eg (19/26-35/44 cm) : Limon moyen sableux - gris pâle (10 YR7/2) - frais - infiltration de matière humifère - faible colonisation par les racines moyennes, assez bonne par les petites. Quelques racines mortes - taches ferro-manganiques plus nombreuses, noires (7,5 YR2/1), quelques concrétions - 20 % de plages oxydées ocre rouge (5YR4/6) , à brun (7,5 YR5/8), 5 % de plages réduites gris pâle (5Y7/1) - quelques éclats de cailloux - revêtements argilo-ferriques et manganésifères fins et discontinus - structure polyédrique subangulaire fine , modérément développée, angulaire localement, présence de langues de E - assez compact. Limite distincte et ondulée.

BTgd1 (35/44 - 57/61 cm) : Limon argileux - brun jaune (10 YR5/6) - frais - faible colonisation par les petites racines, enracinement à tendance verticale très nette - quelques taches ferro-manganiques - 30 % de plages oxydées ocre rouge (5YR4/6) , à brun (7,5 YR5/8), 2 à 3 % de plages réduites gris pâle (10 YR7/1 à 5Y7/1) localisées aux abords des plages de dégradation - quelques petits cailloux - revêtements argilo-ferriques, brun (7,5 YR5/8), fins et presque continus sur les faces horizontales de la structure lamellaire (ferri-argilanes) - structure lamellaire, de forme irrégulière, moyenne assez bien développée et polyédrique angulaire fine à très fine modérément développée - Ferme et compact - Limite distincte et ondulée

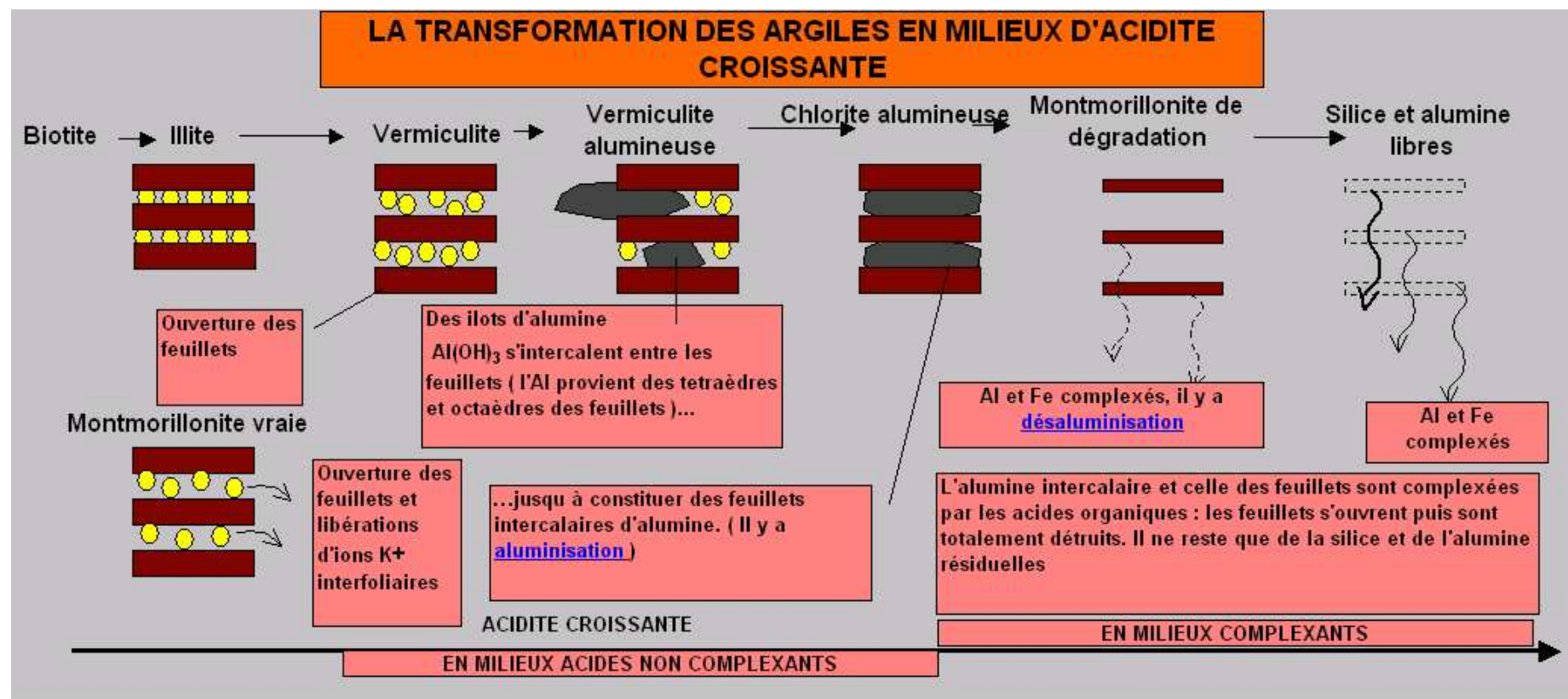


Figure 30 : La transformation des argiles en milieux d'acidité croissante

V. PODZOSOLS (Podzols, CPCS)

5.1. Généralités

Les PODZOSOLS présentent des solums où **le processus de podzolisation est dominant.**

Le concept de podzolisation implique :

- **un processus biogéochimique d'altération dit acido-complexolyse, défini comme une attaque des minéraux primaires par des solutions contenant des composés organiques acides et complexants. Cette attaque a pour effet l'élimination de l'aluminium et du fer ainsi que celle des autres cations (Ca, Mg, K, Na,etc.). Il se forme alors un horizon résiduel, essentiellement quartzeux (composés de sable), correspondant à un horizon E.**
- **un processus de migration et d'immobilisation des constituants organiques et de complexes organo-minéraux d'aluminium et/ ou de fer. L'accumulation de ces substances conduit à la formation d'un horizon podzolique BP.**

Certains BP ont une teneur élevée en carbone par rapport aux teneurs en Al et Fe : on les nommera alors BPh.(h pour humus). Par contre, d'autres ont une teneur en C plus faible et Al et Fe sont alors dominants : on les appellera BPs (s pour sesquioxydes). Ces deux types d'horizons BP peuvent exister dans un même solum, dans ce cas l'horizon BPh est situé au-dessus de l'horizon BPs.

5.2. Solum diagnostique

Classiquement, le **solum diagnostique** des PODZOSOLS est du type :

A / E / BP / C

ou

A / E / BPh / BPs / C

Nous verrons par la suite que, selon les Références, il faudra y apporter quelques nuances.

L'horizon BP podzolique est l'horizon obligatoire des PODZOSOLS. il est caractérisé par une **accumulation de produits amorphes constitués par des matières organiques et de l'aluminium, accompagné ou non de fer.** Ces produits forment des revêtements, qui donnent à l'horizon BP **une teinte ocre (7,5 YR du code Munsell) à rougeâtre à l'état humide.**

Certains BP ont une teneur élevée en carbone par rapport aux teneurs en Al et Fe : on les nommera alors **BPh** (h pour humique). Par contre, d'autres ont une teneur en C plus faible et Al et Fe sont alors dominants : on les appellera **BPs** (s pour sesquioxides).

Ces deux types d'horizons BP peuvent exister dans un même solum, dans ce cas l'horizon BPh est situé au-dessus de l'horizon BPs.

Enfin, l'horizon BP peut être meuble mais une cimentation continue d'une partie de celui-ci par les constituants amorphes peut se produire.

L'horizon A n'existe pas toujours : on peut observer un horizon E directement sous l'OH des moders.

Lorsque A existe, il est acide ou très acide ($\text{pH}_{\text{eau}} < 5$), riche en matières organiques, de couleur sombre : c'est un horizon A de juxtaposition ou un A de diffusion.

5.3. Les conditions de formation des PODZOSOLS sont :

a) Un climat froid et / ou pluvieux :

FROID : il ralentit la décomposition des litières, qui forment beaucoup d'acides organiques solubles : sous climat boréal ou alpin, la podzolisation se produit quelles que soit les roches-mères et la végétation (sauf si elles sont très calcaires ou très riches en fer : Ca et Fe neutralisant les acides).

Les matières organiques s'accumulent en des horizons O épais.

PLUVIOSITE :

La forte pluviosité :

- permet, en période humide, le passage du fer à l'état ferreux, forme sous laquelle il se combine aux acides organiques pour former des complexes solubles, donc lessivables ;
- favorise le lessivage intense qui caractérise les sols podzolisés.

De ce fait, on observe les PODZOSOLS dans toutes les régions à climat humide :

- en zone boréale (température moyenne annuelle inférieure à 8°C), sous la taïga ;
- en montagne (étages subalpin et montagnard),
- en zones tempérées, seulement sur matériaux pauvres chimiquement (sables quartzeux, grès).

Le climat océanique bien arrosé et frais (Normandie, Bretagne par exemple) est assez favorable également dans la mesure où le faible ensoleillement ralentit la décomposition des litières et l'humification. Toutefois, la podzolisation y sera plus lente qu'en climat boréal ou alpin et elle ne pourra s'exprimer significativement que si les autres conditions (substrat et végétation) sont très favorables. C'est ce qui explique que nous aurons souvent, sur substrats acides, sous ce climat des podzolisations modérées donnant naissance à des micropodzols ou des PODZOSOLS OCRIQUES.

b) Une roche-mère filtrante et pauvre en fer et en bases :

La perméabilité accentue le lessivage, mais il faut encore que le milieu soit pauvre en bases, en fer, et en argiles fines. Dès que ces éléments dépassent un certain seuil, ils insolubilisent les acides organiques qui ne peuvent plus complexer le fer et l'alumine des argiles.

Et de fait, sous climats tempérés, les PODZOSOLS ne se forment que sur sols pauvres en argiles, en calcium et en fer : sur les sables des Landes de Gascogne, de la Sologne, les quartzites de Bretagne ou de la forêt de Fontainebleau, les granites pauvres en feldspaths et en micas, etc.

c) Une végétation acidifiante :

En conditions très favorables à la podzolisation (climat froid ou très humide, sol très filtrant et pauvre en bases et en fer), celle-ci se produit quelle que soit la végétation (par exemple en Normandie et en Bretagne, la podzolisation peut intervenir même dans des chênaies ou des chênaies-hêtraies). Mais plus généralement, c'est une végétation acidifiante à base de résineux purs et d'éricacées (bruyères, callune, myrtilles,...) qui s'installe sur les sols siliceux et provoque ou accentue la podzolisation par le mor qu'elle produit.

5.4. REFERENCES :

Parmi les 8 Références proposées dans le Référentiel Pédologique, nous n'en verrons que 3.

Comme nous l'avons déjà vu, l'horizon BP est l'horizon obligatoire des PODZOSOLS.

Les Références³ seront distinguées :

- selon les caractéristiques de cet horizon BP : meuble, induré ou cimenté, humique ou sesquioxydique.
- selon la présence ou l'absence d'un horizon E.

³Pour les non PODZOSOLS, des qualificatifs peuvent être utilisés pour indiquer l'existence d'un processus de podzolisation :

- à micropodzol : un « épisolum » podzolique E + BP ou A + BP existe, sur une épaisseur inférieure à 20 cm, en surface et au-dessus d'un solum permettant de définir une autre Référence (exemple : LUVISOL DEGRADE à micropodzol).

- podzolisé : (en cours de podzolisation) qualifie un horizon ou un solum dans lequel un processus de podzolisation peut être mis en évidence sans qu'il y ait formation d'un véritable horizon BP.

a) PODZOSOL DURIQUE :

Le solum diagnostique est :

A / E / BPh / (BPs) / C

L'horizon BPh est induré ou cimenté (alios) avec ou non un Bps sous-jacent. Le contraste entre les horizons E et Bph est très fort et la transition brutale.

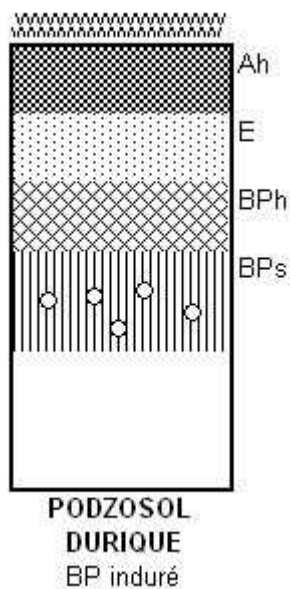


Figure 31 : Schéma général d'un PODZOSOL durique

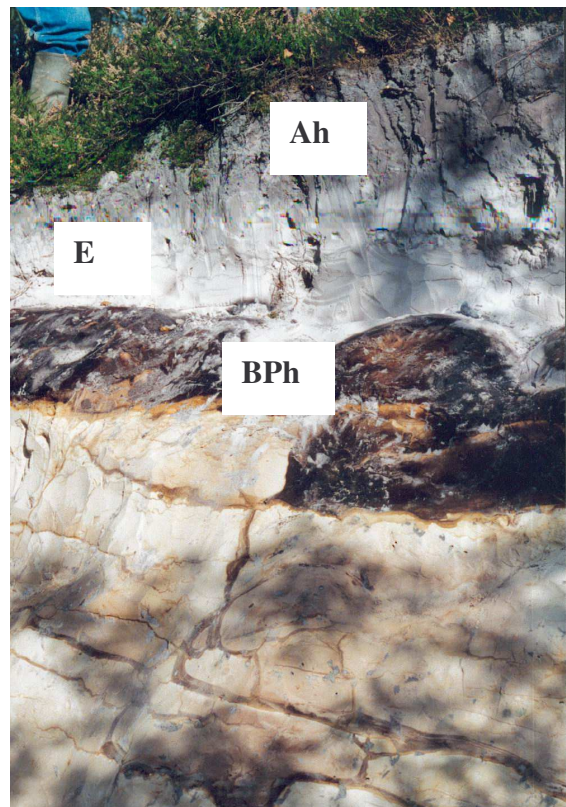


Figure 32 : PODZOSOL DURIQUE- Landes sèche à callune de Versigny (02) – Voir exemple sur cd rom

b) PODZOSOL OCRIQUE (Sols ocres podzoliques, CPCS) :

Le solum diagnostique est :

A / BPh / BPs / C

Typiquement, l'horizon BP est un BPs surmonté par un BPh peu développé. Cependant, l'horizon BP peut être un BPh (matériaux sableux très pauvre en minéraux altérables). Le contraste entre A et BP est peu accentué et la transition progressive. Ils correspondent aux anciens « sols ocres podzoliques » de la CPCS.

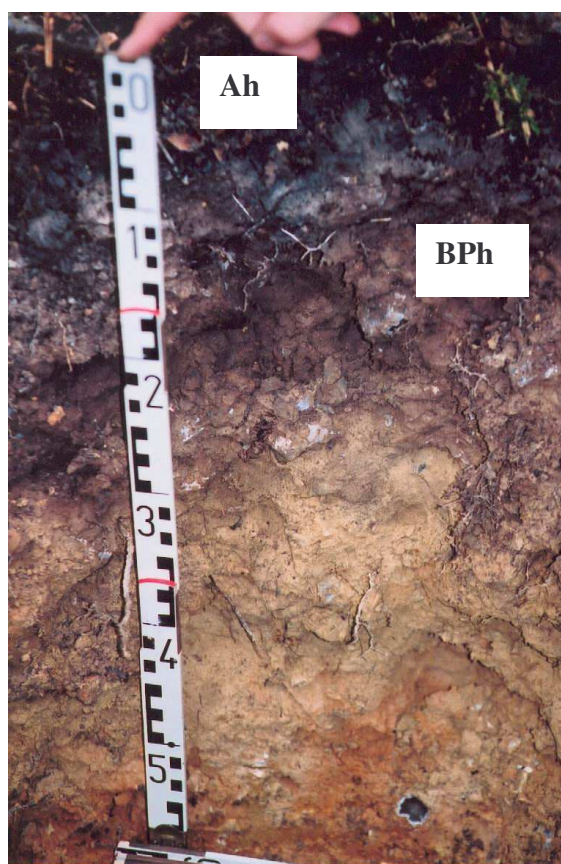


Figure 33 : PODZOSOL OCRIQUE
Massif du Trait Maulévrier (76)
Limon caillouteux peu épais sur argile à silex -
10/9/00 – Voir exemple sur cd rom

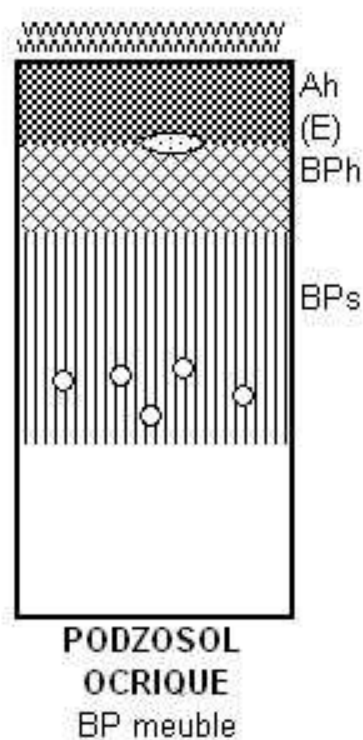


Figure 34 : Schéma général d'un PODZOSOL ocrique

c) PODZOSOL MEUBLE :

Le solum diagnostique est :

A / E / BP / C

L'horizon BP est meuble, il peut être un BPh ou un BPs . Le contraste entre les horizons E et BP est peu accentué et la transition est assez progressive.

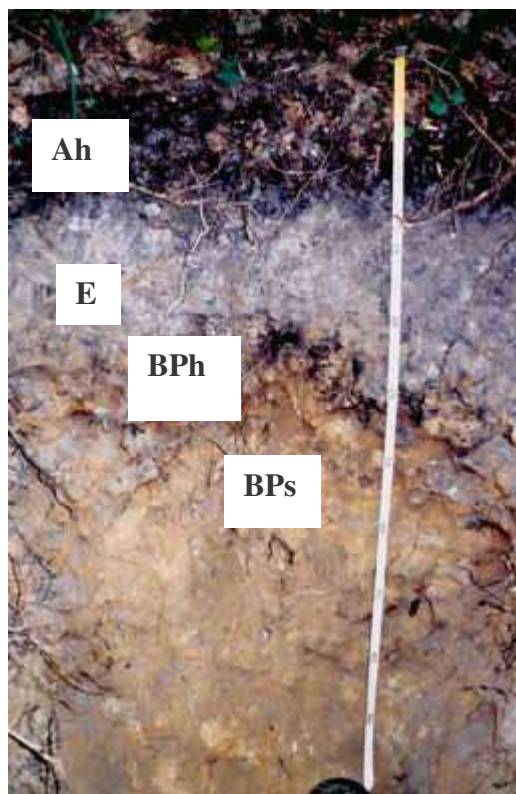


Figure 35 : PODZOSOL MEUBLE - Forêt de Hallouze (61) - 10/8/03 (Voir exemple sur cd rom)

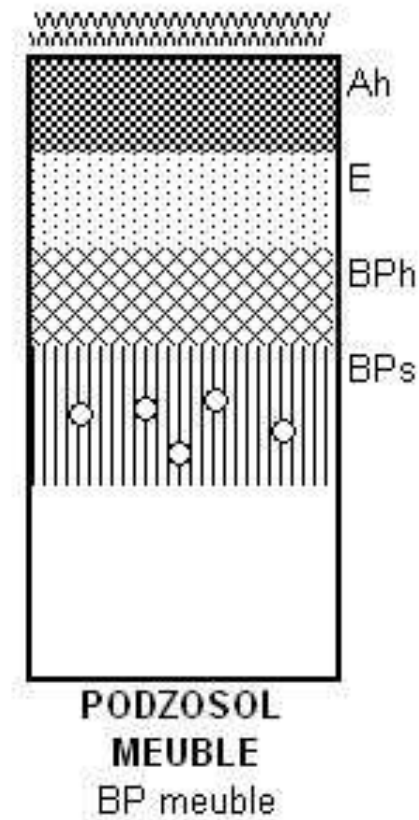


Figure 36 : Schéma général d'un PODZOSOL ocrique

5.5. Pédogenèse :

5.5.1. Le processus de podzolisation : schéma général

Le processus le plus classique de podzolisation peut être illustré et expliqué par quatre phases (voir figure 37) :

- destruction du complexe ARGILE-FER-HUMUS par les acides organiques issus du mor, et formation, avec le fer réduit Fe^{2+} , de complexes organo-minéraux lessivables : Fe-acides organiques.
- destruction des argiles par les acides organiques issus du mor : formation de complexes organo-métalliques lessivables Al-acides organiques, et de silice résiduelle qui reste dans l'horizon E.
- accumulation des oxydes de fer et d'alumine dans l'horizon BP. Condensation des acides organiques sous forme d'acides fulviques peu colorés dans ce même horizon BP.
- polymérisation des acides organiques et des acides fulviques sous forme d'acides humiques très foncés (brun-noir) dans la partie supérieure de l'horizon BP : formation d'un horizon BPh arrêtant et concentrant les substances organiques. Accumulation accentuée des oxydes de fer et d'alumine dans l'horizon BPs.

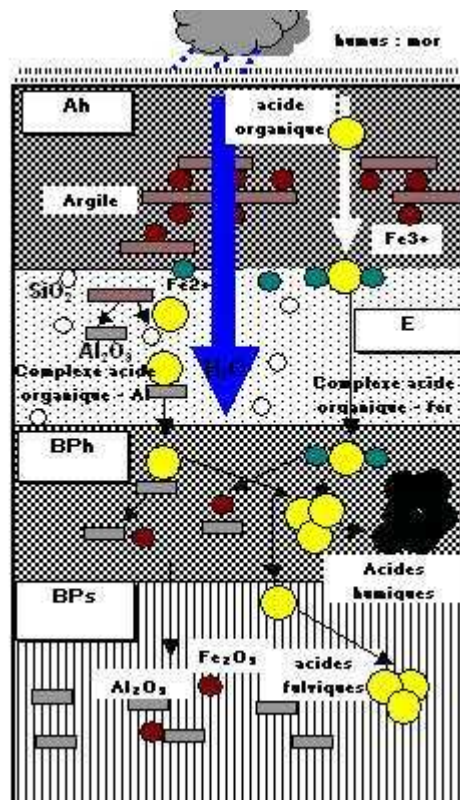


Figure 37 : Schéma général du processus de podzolisation

5.5.2. Les étapes de la podzolisation

A. Elaboration des composés organiques complexants

La podzolisation résulte d'une **acidification accentuée de l'humus** (mor) qui produit alors de **grandes quantités d'acides organiques solubles** qui migrent en profondeur. **Cette migration débute par la production de composés organiques simples** (acide oxalique, acide citrique , acide tartrique,...) ou à poids moléculaire peu élevé (acides fulviques ou acides précurseurs) **qui dominent dans les sols à podzolisation commençante ou modérée**. Parmi ces composés, on trouve ceux qui interviendront dans la complexation du fer et de l'aluminium, issus de l'altération des minéraux, notamment argileux : il s'agit des acides citrique et oxalique, ainsi que des acides fulviques (complexants efficaces seulement à concentration élevée pour ces derniers, ce qui est le cas dans les PODZOSOLS).

NB. Dans les sols à podzolisation accentuée (PODZOSOL DURIQUE), des composés à poids moléculaire élevé (acides humiques notamment), plus polymérisés, migreront pour s'accumuler ensuite dans l'horizon BPh.

B. Complexolyse et migration

Il s'agit d'une **altération des minéraux silicatés réalisée par l'intervention des acides organiques** cités dans le paragraphe précédent. Ces acides sont capables d'**extraire et de mobiliser par complexation les atomes d'aluminium et de fer intégrés dans les feuillets cristallins des phyllosilicates** (argiles). En outre, concernant l'aluminium, ils extraient non seulement les formes d'Al interfoliaire, mais aussi l'Al contenu dans les tétraèdres et les octaèdres. Ceci a pour conséquence que **les argiles subissent en milieu acide et complexant, une désaluminisation**. Aussi, dans certains cas (pour certains minéraux argileux), les feuillets sont finalement démantelés puis détruits ; il y a alors **destruction complète du minéral argileux** .

En règle générale, **la formation de complexes Fe-acide organique ou Al - acide organique intervient à PH très bas, inférieur à 4-4,5 et pour le fer, en période de forte pluviosité (sol saturé par l'eau)**. A ce moment, **le fer est à l'état ferreux (Fe^{2+}) et forme des complexes stables**, pouvant migrer en profondeur.

Dans les sols plus aérés, les complexes formés sont moins stables et moins mobiles ; la précipitation intervient plus rapidement (cas des PODZOSOLS OCRIQUES où l'horizon E est inexistant ou ne forme qu'un liseré généralement fin et discontinu.

Qu'est-ce qui peut donc limiter la migration des composés organiques complexants ?

En fait, si les cations Al et Fe (cations polyvalents) sont libérés en trop grande quantité, les composés organiques fixent tant de cations qu'ils sont immobilisés immédiatement et il n'y a pas de migration de matière organique. Par contre, si la quantité de cations polyvalents libérés par altération des minéraux argileux est insuffisante pour saturer les composés organiques mobiles formés, ces cations seront fixés par ces composés sans les immobiliser et seront alors entraînés.

Conclusion : ceci explique qu'il ne peut y avoir podzolisation significative dans les sols suffisamment riches en argiles et en fer, ni dans les sols où l'aluminium est suffisamment abondant sur le complexe adsorbant (ALOCRISOLS).

C. Précipitation des complexes dans l'horizon BP

Comment s'amorce la formation de BP ?

Dans les milieux filtrants et pauvres (sables quartzeux), **les complexes formés ont un rapport cation polyvalent (Al, Fe, Mg) / anion (acides organiques) très faible, ce qui les maintient à l'état soluble et assure leur mobilité. Ces complexes s'insolubilisent au niveau du BP par la brusque augmentation du rapport cation / anion.** L'activité biologique, qui n'est pas négligeable au sommet de BP, intervient en biodégradant une partie des anions complexants, ce qui élève le rapport cation/anion et libère une partie des ions Al et Fe. **Cette alumine et ce fer alors libérés s'immobilisent et précipitent. Les hydrates de fer et d'aluminium libres ainsi formés agissent ensuite à leur tour en insolubilisant par adsorption la silice soluble et les nouveaux complexes** apportés par les migrations ultérieures.

D'autres mécanismes peuvent intervenir dans l'accumulation des complexes et leur immobilisation au sein de BP :

- 1) durant la migration, les composés encore mobiles viennent en contact avec des cations supplémentaires (fer notamment) et les complexent jusqu'à ce que la charge soit suffisamment neutralisée pour être immobilisés.
- 2) une dessiccation peut entraîner une augmentation de la concentration en cations et donc une neutralisation de la charge des complexes et leur polymérisation (notamment par établissement ponts hydrogènes entre molécules et de liaisons établies par l'intermédiaire de cations polyvalents)
- 3) une légère augmentation du PH et la présence de cations basiques (Ca^{2+}), peut également neutraliser les complexes organométalliques qui s'immobilisent alors.

Comment se différencient BPh et BPs ?

Au départ, les deux horizons se constituent en même temps et on y observe une migration sélective des composés organiques ; les petites molécules migrant plus profondément que les grosses (polymères). Chaque élément précipité évolue ensuite de manière progressive en se polymérisant encore davantage sous l'effet des alternances d'humidité saisonnières et de l'action catalytique du fer ferrique libre existant en BP. C'est ainsi que se forment les acides humiques qui domineront dans BPh et qui lui donneront sa couleur foncée, et les acides fulviques(peu colorés) dominants dans l'horizon BPs.

Signalons aussi que l'aluminium est plus mobile que le fer et qu'il s'accumule surtout en BPs.

Ensuite, pour les PODZOSOLS les plus différenciés (PODZOSOLS DURQUES), on observe que, au fur et à mesure que le podzol vieillit, l'horizon BPh s'enrichit de plus en plus en hydroxydes de fer libres qui est un facteur d'insolubilisation des composés organiques et donc à la longue tous les complexes, quelque soit leur grosseur sont insolubilisés et immobilisés dans BPh. Cet horizon devient donc une barrière chimique infranchissable pour les complexes mobiles.

Enfin, dans les PODZOSOLS très anciens (parfois un ou plusieurs milliers d'années) et très différenciés, il peut se produire des remobilisations au sein de BP et des reprécipitations en profondeur.

5.6. EVOLUTION DES SOLS VERS LES PODZOSOLS PAR DEGRADATION

La formation des PODZOSOLS peut s'expliquer « naturellement » dans les cas suivants :

- en zone boréale (ou à l'étage subalpin en montagne) : le climat conduit l'évolution des sols vers la podzolisation, cela sur des roches-mères de nature variée. Le PODZOSOL se trouve en équilibre avec les conditions climatiques et une forêt résineuse acidifiante (taïga).
- dans l'étage montagnard de certains massifs montagneux (Vosges, Alpes, Massif Central) : une podzolisation directe et rapide caractérise les affleurements de grès et de granites acides. La forêt en équilibre avec la station est le plus souvent une hêtraie ou une hêtraie-sapinière à myrtille. Le degré de podzolisation est lié à la teneur en fer et en argile du matériau.

Toutefois, dans certains cas, la formation des PODZOSOLS résulte d'une dégradation du milieu et est caractérisée par une podzolisation indirecte et progressive (voir annexe 2). C'est le cas par exemple de la dégradation de la chênaie atlantique des plaines sableuses : la podzolisation ne s'enclenche qu'à la suite du lessivage préalable, accentué, d'un profil sablo-limoneux, provoquant un appauvrissement de la partie supérieure du profil, et favorisant l'installation progressive d'une lande à bruyères. Cette série évolutive de sols est caractérisée par la persistance en profondeur d'un ancien horizon BT, témoin de la phase forestière initiale.

Cette dégradation peut se résumer de la façon suivante (figure 38) :

Lessivage acide et podzolisation sont des phénomènes voisins, dus aux mêmes causes : une litière dégradante, une mauvaise activité biologique, la pauvreté en bases. Sur roches-mères filtrantes et pauvres en argiles, la podzolisation prend le relai du lessivage acide :

a) La transformation du moder en mor :

Sur sol siliceux acide, la chênaie atlantique (climacique) évolue vers la chênaie dégradée à bouleaux et éricacées, puis en lande sèche à éricacées.

Dès l'apparition des bruyères, la litière, très difficile à décomposer à cause d'un C/ N élevé, donne naissance à un mor. Celui-ci produit beaucoup d'acides organiques solubles.

b) Le mor, un humus agressif :

Ces acides organiques sont dits « agressifs » vis à vis des argiles. Au cours de leur migration vers le bas du profil, ils vont être responsables de deux dégradations :

- Comme dans le cas du lessivage acide, ils forment avec le fer lié aux argiles, des complexes fer-organique détruisant le complexe argilo-humique ou l'empêchent de se former faute de « pont ferrique ». Le fer est complexé sous forme réduite Fe^{++} , d'où la nécessité d'une période même temporaire d'anaérobiose ;
- Non seulement ils détruisent le complexe argilo-humique, mais encore ils détruisent les feuillets de l'argile elle-même, dont ils extraient l'alumine et le fer pour former des complexes Al-organique et Fe-organique.

Cette attaque de l'argile par les acides organiques du mor est appelé **complexolyse** (voir plus haut). Quant à l'entraînement de ces complexes par lessivage, c'est le phénomène de **chéluviation**.

Ces complexes plus ou moins solubles sont instables : il suffit d'une augmentation du PH en profondeur pour qu'ils précipitent :

- le fer et l'alumine s'oxydent et s'accumulent sous forme de Fe_2O_3 et Al_2O_3 , en un horizon BPs (s pour sesquioxydes) ;
- les composés organiques se polymérisent sous forme d'acides fulviques peu colorés qui s'accumulent aussi dans cet horizon BP.

A cours de ce processus, le LUVISOL TYPIQUE du départ est devenu un LUVISOL podzolisé (apparition d'un BPs encore peu marqué et discontinu) puis un PODZOSOL MEUBLE(horizon BPs continu et assez net, mais le contraste entre E et BP est peu accentué avec une transition progressive).

Au stade **PODZOSOL MEUBLE**, la dégradation est déjà bien avancée et la chênaie dégradée à bouleaux et callune est bien peu productive. L'homme est alors tenté de la remplacer par des résineux : la dégradation s'en trouve alors accélérée. Le mor produit par les aiguilles de pins (sylvestre notamment), épicéas communs, sapins, est encore plus défavorable à l'activité biologique, acidifiant et agressif.

A ce moment, l'horizon E devient totalement cendreux, et les complexes organiques lessivés se polymérisent non seulement en acides fulviques dans l'horizon BPs , mais aussi en acides humiques noirs, pour former un horizon BPh au dessus de l'horizon BPs. A ce moment, on arrive au stade **PODZOSOL DURIQUE** où le contraste entre E et BPh est très fort et la transition brutale.

Le stade **PODZOSOL DURIQUE** est le stade ultime de la dégradation des BRUNISOLS sur roche acide filtrante.

Parfois, on distingue encore sous l'horizon BP, l'ancien horizon BT qui rappelle l'origine du PODZOSOL.

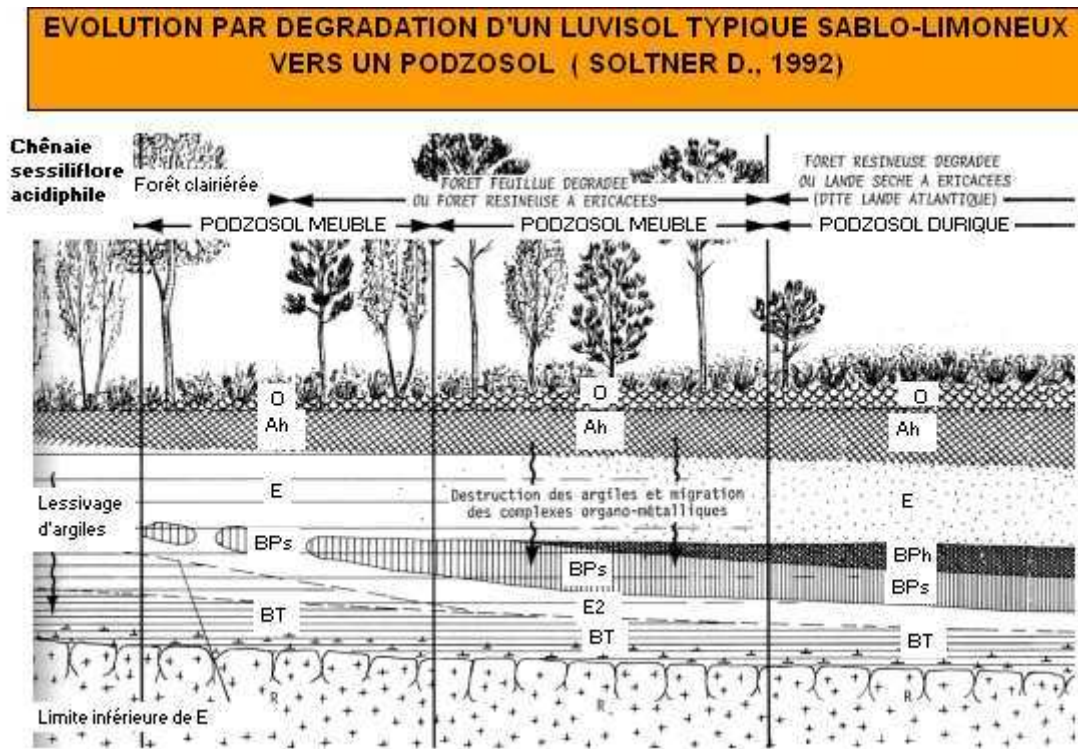


Figure 38 : Evolution d'un LUVISOL vers un PODZOSOL par dégradation

D) Les PODZOSOLS et l'hydromorphie :

En cas d'hydromorphie (présence d'une nappe permanente ou presque), la podzolisation peut se compliquer d'un processus de réduction du fer, qui accroît sa mobilité et provoque son entraînement latéral.

Dans les roches-mères sableuses où la circulation des eaux est relativement rapide, la redistribution du fer se fait généralement sur des distances assez grandes ; des parties du paysage quasi-totalement apopauvries en fer s'opposent alors à d'autres parties où celui-ci s'accumule.

Les PODZOSOLS hydromorphes sont alors caractérisés par la quasi-absence de fer dans tout le solum (profil) ou, si le fer est présent, il l'est sous forme de nodules ferrugineux, voire de bancs ferrugineux (appelés garluches) dans les horizons BP ou C.

Par exemple, dans les Landes de Gascogne, où les PODZOSOLS hydromorphes sont fréquents, on trouve selon la topographie la chaîne de sols illustrée ci-contre (figure 39).

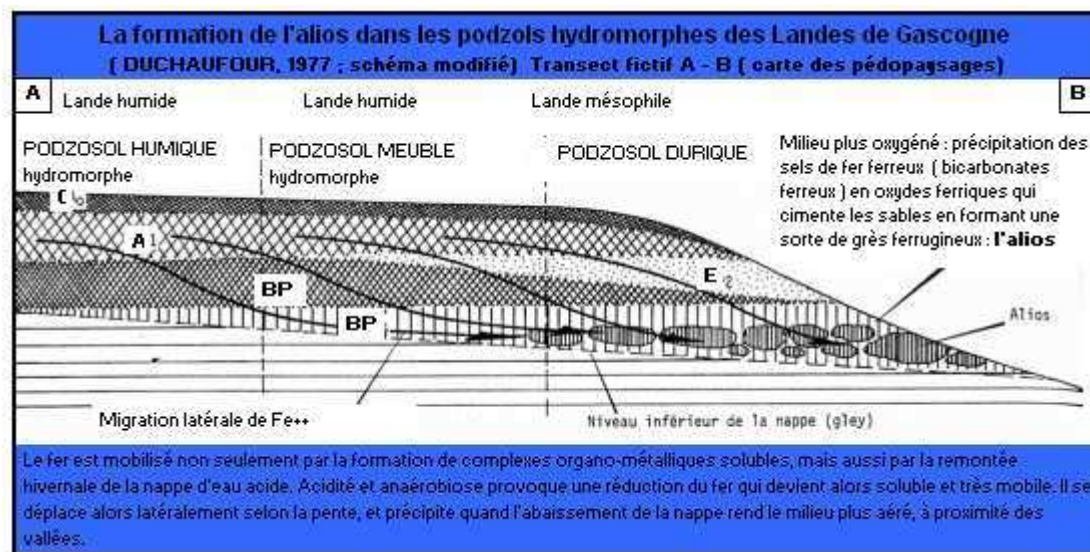


Figure 39 : La formation de l'ALIOS dans les Landes de Gascogne

On y distingue :

- des PODZOSOLS hydromorphes dépourvus ou presque de fer ;
- des PODZOSOLS hydromorphes à concrétions ferriques ;
- des PODZOSOLS DURRIQUES à alios : l'alios, ciment ferrugineux englobant des grains de sables en des dalles ayant parfois plusieurs décimètres d'épaisseur, se forme dans les zones plus basses, par arrivée massive de sels de fer migrant sous forme ferreuse et précipitant au niveau d'un affleurement, par exemple d'une vallée.

E) Mise en valeurs des PODZOSOLS :

Les PODZOSOLS sont des sols très pauvres chimiquement et très acides. Il en résulte parfois des toxicités (notamment aluminiques) et des carences (en cuivre, cobalt, bore). Pour tout reboisement, il convient d'activer l'humus superficiel, par travail peu profond (mélanger matières organiques et matière minérale), et parfois par apport d'engrais ou d'ammendements (P, Ca surtout) ; le sous-solage s'avère indispensable s'il existe un alios trop proche de la surface.

Les PODZOSOLS présentent souvent des réserves en eau très faibles en périodes estivales : textures souvent grossières, enracinement parfois limité par les horizons BP indurés. En revanche, certains PODZOSOLS souffrent d'exès d'eau sous formes de nappes phréatiques peu profondes (Landes de Gascogne). A ce titre, les Landes de Gascogne, autrefois marécageuses, ont été assainies par drainage et plantées en pin maritime au XIXème siècle ; lorsque l'alios est superficiel, le reboisement doit être précédé d'un sous-solage.

Les PODZOSOLS OCRIQUES ou MEUBLES sont encore assez productif car l'horizon BP est meuble et se laisse encore bien pénétré par les racines. Par contre, les PODZOSOLS DURRIQUES à alios, sont très défavorables à toute végétation : E est stérile, et l'alios oppose un obstacle impénétrable aux racines ; seul les horizons O et A sont fortement colonisés par les radicelles absorbantes des espèces qui sont munies de mycorhizes (résineux).

En plaine, l'enrésinement, souvent pratiqué, doit maintenir un sous-étage feuillu, pour éviter une aggravation de la dégradation.

La mise en culture (maïs) n'est possible que sur les PODZOSOLS MEUBLES où la nappe, n'atteignant pas la surface en hiver, s'abaisse à 1,5 m environ en été. Les améliorations chimiques (apports de N,P,K,Ca, et même oligo-éléments) s'avèrent indispensables ; la fertilisation nécessitant des apports à doses faibles et répétées.

VI. SOLUMS HYDROMORPHES

Ces sols sont caractérisés par une oxydo-réduction du fer liée à la présence permanente ou temporaire d'une nappe. Ces sols comportent au moins un horizon présentant des caractères attribuables à un excès d'eau.

Les causes possibles de l'excès d'eau sont :

- présence d'une nappe profonde, pouvant osciller ;
- présence d'un horizon peu perméable empêchant l'infiltration de l'eau (nappe perchée) ;
- inondation, apports latéraux, etc.

La saturation des horizons par l'eau, c'est-à-dire l'occupation de toute la porosité accessible, peut prendre des formes différentes : si elle se manifeste le plus souvent sous forme de nappe, perchée ou profonde (eau libre), elle peut aussi prendre la forme d'une imbibition capillaire (eau plus ou moins fortement liée au sol) en l'absence de pores grossiers. La saturation par l'eau est plus ou moins durable au cours de l'année, elle peut affecter une partie ou la totalité du solum.

La saturation par l'eau limite les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Il peut en résulter un déficit en oxygène plus ou moins prolongé, qui entraîne :

- le développement de processus d'oxydo-réduction qui modifient la mobilité des constituants du sol , d'où des redistributions particulières de certains éléments, notamment du fer ;
- une évolution spécifique de la fraction organique lorsque la saturation intéresse la partie supérieure des solums. L'anaérobiose provoque un ralentissement et une modification de l'activité biologique. Ceci se traduit par une augmentation des teneurs en matières organiques.

6.1. Horizons de Référence :

Ce sont des horizons qui présentent des organisations correspondant à une répartition particulière du fer.

Le fer constitue un bon indicateur d'hydromorphie, en raison de son rôle dans le développement des processus d'oxydo-réduction dans les sols et de la netteté des manifestations qui accompagnent sa réduction (et sa mobilisation) et son oxydation (et son immobilisation).

Lorsqu'un déficit en oxygène apparaît dans un sol saturé d'eau, les nitrates puis les composés manganiques sont les premiers constituants à être réduits. Mais du fait de leurs teneurs généralement faibles dans les sols, leur rôle est limité dans le temps. Par contre, l'état d'oxydoréduction du sol saturé d'eau paraît durablement contrôlé par le système fer ferreux / fer ferrique ; les composés ferriques représentant une réserve importante susceptible de se réduire (**et donc d'accepter des électrons**) dans les réactions d'oxydoréduction .

Processus	Réaction
NO_3^- : disparition	$\text{NO}_3^- + 2 \text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O}$
Mn^{2+} : formation par réduction du manganèse	$\text{MnO}_2 + 2 \text{e}^- + 4\text{H}^+ \rightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$
Fe^{2+} : formation par réduction du fer	$\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$

Le développement des processus d'oxydoréduction se manifeste de façon très visible en ce qui concerne le fer, par des variations de couleur (teintes grises du fer réduit, teintes jaune-rouge à brun-rouge du fer oxydé) et, comme nous le verrons par la suite, une redistribution particulière liée à la plus grande mobilité du fer sous forme réduite.

A) Horizons réductiques (notation Gr et Go) :

Leur morphologie est à attribuer à la prédominance des processus de réduction et de mobilisation du fer. Dans les horizons réductiques, **la répartition du fer est plutôt homogène**. Lorsque la porosité et les conditions hydrologiques permettent le renouvellement de l'eau en excès, ces horizons s'appauvrissent progressivement en fer. Parfois, en conditions acides, il peut y avoir déferfification complète et blanchiment de l'horizon.

La morphologie des horizons réductiques varie sensiblement au cours de l'année en fonction de la persistance ou du caractère saisonnier de la saturation (battement de nappe profonde) qui les génère. D'où la distinction entre horizons réductiques sensu stricto et ceux temporairement réoxydés.

Les horizons réductiques sensu stricto (notés Gr⁴ = gley réduit) sont caractérisés par leur couleur qui peut être soit uniformément bleuâtre à verdâtre (sur plus de 95 % de la surface du profil), soit uniformément blanche à grisâtre. L'engorgement en eau y est permanent ou quasi. Le fer libre est pour la plus grande part sous forme ferreuse.

⁴Anciennement Horizon de gley réduit (CPCS).

Dans les horizons réductiques temporairement réoxydés (notés Go⁵ = gley oxydé), la saturation par l'eau est interrompue périodiquement. Des taches de teintes rouille, souvent pâles, sont observables pendant les périodes de non saturation, au contact des vides, des racines, sur les faces de certains agrégats. Il y a une redistribution centrifuge du fer, migrant lors du dessèchement de l'horizon, de l'intérieur des agrégats vers leur périphérie.

Le fer s'immobilise alors sous forme de fines pellicules d'hydroxydes. Mais ce phénomène est fugace : les immobilisations de fer disparaissent dès que l'horizon, de nouveau saturé, redevient le siège de processus de réduction et de mobilisation du fer qui tendent à en uniformiser la répartition dans l'horizon.



Figure 40 : horizon de gley oxydé (Go)

B) Horizons rédoxiques (notation g ou -g) :

Les horizons rédoxiques (symbolisés par la lettre g ou -g), sont caractérisés par une juxtaposition de plages, de traînées grises (ou simplement plus claires que le fond de l'horizon) appauvries en fer et de taches, de nodules, voire de concrétions de couleur rouille (brun-rouge, jaune-rouge, etc) enrichies en fer.

Les taches d'oxydation et / ou de décoloration peuvent être assez nombreuses (2 à 20 % de la surface de l'horizon) à très nombreuses (horizon bariolé). Elles peuvent être très fines (1 à 2 mm) à grosses (plus de 15 mm) , peu contrastées ou contrastées.

Dans les horizons rédoxiques, la répartition du fer est très hétérogène. La couleur des surfaces des agrégats, plus claires que leur partie interne, résulte d'une **migration du fer vers l'intérieur de ces agrégats**, lors des périodes de saturation. **Le fer s'immobilise à l'intérieur des agrégats quand le dessèchement intervient**, souvent rapidement, dans ce type d'horizon.

⁵ Anciennement Horizon de gley oxydé (CPCS).

Cette **immobilisation du fer est permanente** ; en se maintenant lorsque le sol est à nouveau saturé, les immobilisations de fer **tendent peu à peu à former des accumulations localisées**, donnant des taches de couleur rouille, des nodules, des concrétions (figure 40). Les surfaces décolorées grisâtres correspondent à des concentrations faibles en fer.

Une ségrégation du fer de type rédoxique est donc à attribuer au développement successif de processus de réduction et de mobilisation puis d'oxydation et d'immobilisation du fer, intervenant pendant les périodes de saturation puis de non saturation de l'horizon.



Figure 41 : horizon de pseudogley

6.2. Désignation des solums à caractères hydromorphes :

Pour définir et désigner les Références, deux critères sont utilisés : la profondeur d'apparition des Horizons de Référence G, g ou -g et la présence d'autres Horizons de Référence importants tels que E, BT, BP, Sca, Sal, etc.

a) **Manifestation d'hydromorphie débutant à moins de 50 cm de profondeur** (plus ou moins 10 cm) : les excès d'eau sont considérés comme majeurs vis-à-vis du fonctionnement actuel du solum.

Deux cas :

- présence uniquement de G ou g : rattachement simple aux REDUCTISOLS ou aux REDOXISOLS.
- présence également d'horizons E, BT, BP, Sca, Sci, Sal, etc : rattachement double.
Par exemple : LUVISOL-REDOXISOL, PODZOSOL-REDUCTISOL, CALCOSOL-REDOXISOL.



Figure 42 : LUVISOL-REDOXISOL (Forêt domaniale de Rambouillet, 2003)

b) Manifestation d'hydromorphie débutant entre 50 et 80 cm : les excès d'eau sont considérés comme secondaires et ils sont indiqués par l'utilisation des qualificatifs « réductique » ou « rédoxique » qui s'ajoutent au nom de la Référence.

Exemples : LUVISOL DEGRADE rédoxique ; BRUNISOL MESOSATURE rédoxique, FLUVIOSOL TYPIQUE réductique.

c) Manifestation d'hydromorphie débutant entre 80 cm et 120 cm : les excès d'eau sont considérés comme accessoires et ils sont indiqués par l'utilisation des qualificatifs « à horizon réductique de profondeur » ou « à horizon rédoxique de profondeur » qui s'ajoutent au nom de la Référence.

6.3 . Horizons de surfaces riches en matière organique relatifs à l'existence de conditions anaérobies :

Ces horizons présentent de plus ou moins fortes teneurs en matière organique et des substances dont la nature est propre aux milieux saturés d'eau.

Lorsque la saturation par l'eau atteint la partie superficielle du sol, l'anaérobiose qui s'y développe ralentit la décomposition, la minéralisation de la matière organique fraîche. Elle favorise la production de composés solubles et leur maintien dans le sol en limitant leur biodégradation. L'insolubilisation de ces composés organiques solubles, pour laquelle des constituants minéraux du sol jouent un rôle important, aboutit à la formation d'acides fulviques et humiques.

L'évolution, la composition de la fraction organique du sol, dépendent du développement de processus biologique et par conséquent de la durée de la saturation du sol par l'eau (durée des conditions d'anaérobiose).

C'est ainsi que l'on peut distinguer deux types d'horizons de surface. Les différences entre ces deux types d'horizons résultent globalement de la diminution de l'activité biologique du sol liée à l'existence de conditions anaérobies (donc de la durée et de la continuité de la saturation du sol par l'eau), qu'il s'agisse de l'activité des micro-organismes intervenant dans la décomposition de la matière organique ou de celle de la faune du sol qui assure la fragmentation des substances organiques et leur mélange plus ou moins intime à la fraction minérale du sol.

Horizon de surface temporairement saturé d'eau (type hydromull, hydromoder, hydromor) :

- couleur dominante gris foncé à gris noir, présence de taches de rouille dans les agrégats (réoxydation) ou le long des racines, canaux, etc.
- structure fine devenant massive à débit polyédrique ou grossière cubique ou prismatique, quand la durée de saturation croît ; matière organique plus ou moins mélangée à la fraction minérale suivant l'activité de la faune du sol ; horizon parfois surmonté d'une litière ;
- taux de carbone organique en général inférieur à 8 %.

Horizon de surface longuement saturé d'eau (type anmor - An) :

- couleur gris-noir ;
- structure massive, toucher onctueux lorsque l'horizon est saturé d'eau ; matière organique assez bien mélangée à la fraction minérale du fait de l'activité de la faune du sol lors des périodes de non-saturation ;
- taux de carbone organique supérieur à 8 %.

Un troisième ensemble d'horizons, observés dans des sols constamment saturés d'eau, présentent à la fois une accumulation plus forte et une évolution plus faible de la matière organique. Il s'agit des horizons histiques qui caractérisent les HISTOSOLS (Tourbes).

6.4 . REDOXISOLS et REDUCTISOLS : (Pseudogleys et Gleys, CPCS)

6.4.1. REDUCTISOLS TYPIQUES (à saturation permanente remontant saisonnièrement dans le solum : fluctuation d'une nappe permanente profonde)

Nous nous limiterons ici à l'étude des REDUCTISOLS en milieu peu acides ou basiques.

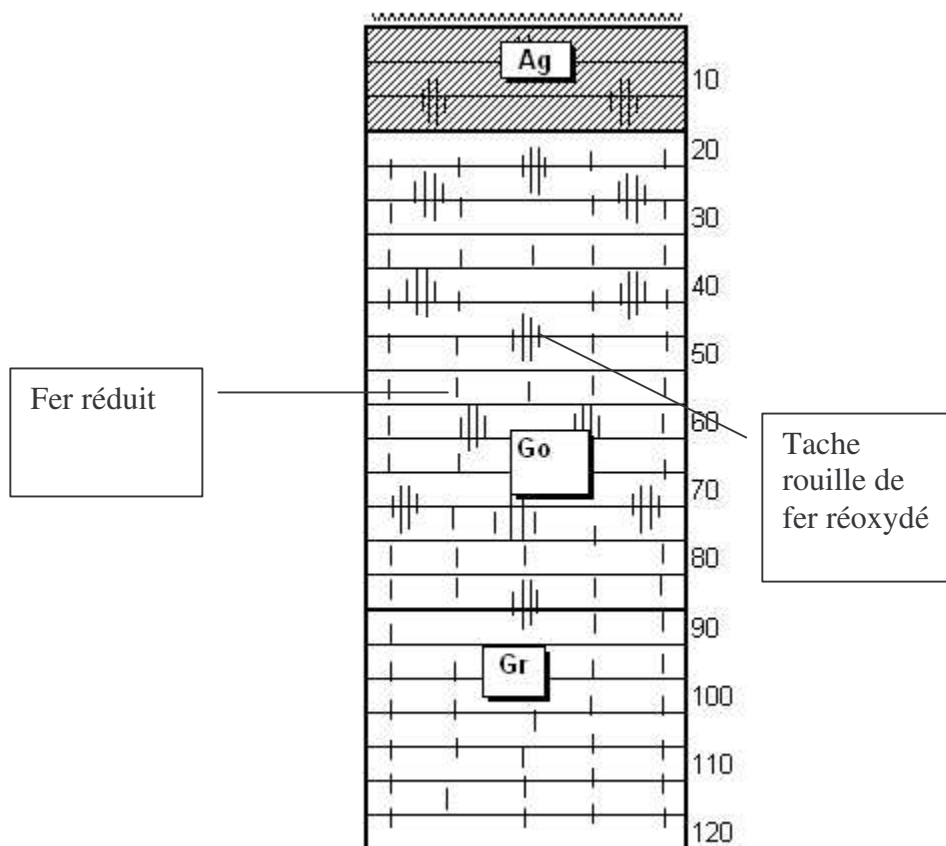
Position topographique :

On les observe en position de fond de vallées, de vallon, de plaine littorale, de dépression, sur alluvions fluviales ou fluvio-marines, ou encore sur alluvions-colluvions récentes.

Solum-diagnostique :

La présence de l'horizon G est liée à l'existence d'une nappe profonde (phréatique) souvent en relation avec le système hydrographique de surface (cours d'eau, étangs, lacs) et localement avec la mer.

Le solum-diagnostique d'un REDUCTISOL TYPIQUE est : A ou An / (S) / Go / Gr



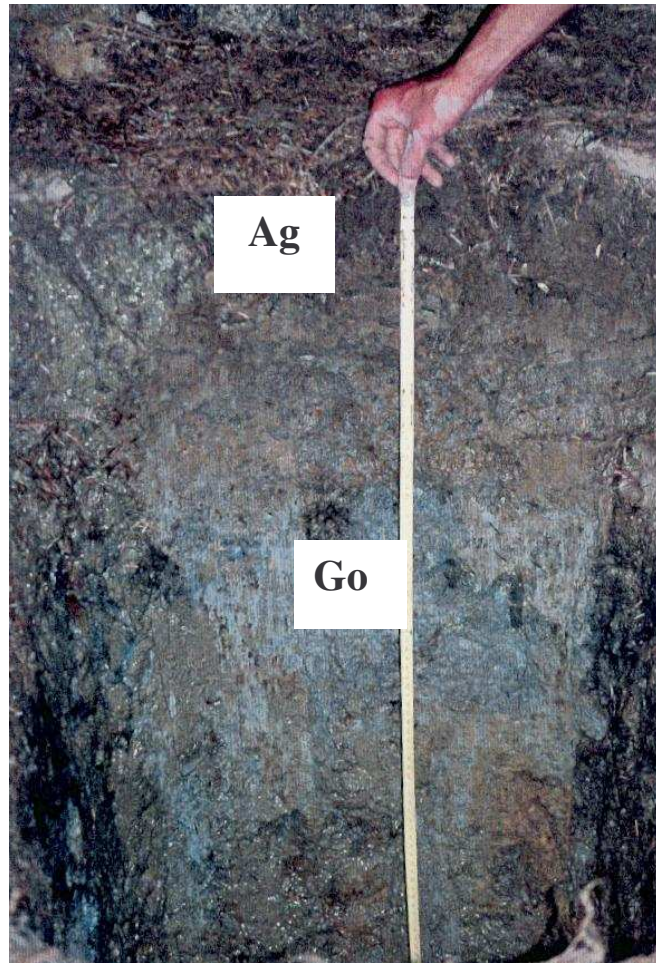


Figure 43 : REDUCTISOL TYPIQUE - Forêt communale de TRELON (59) - 2000

Pédogenèse :

Les conditions réductrices qui règnent dans ces sols provoquent la réduction du fer. Ces conditions réductrices sont plus fortes dans l'horizon Gr que dans l'horizon Go. Ceci étant expliqué par le fait que l'eau de la nappe est plus pauvre en oxygène que celle des pluies qui influencent l'horizon Go.

Par contre l'eau de la nappe est moins acide que l'eau de pluie car transportant de nombreux minéraux dissous, notamment des cations basiques (Ca notamment). Dans ces conditions le PH est plus élevé dans l'horizon Gr que dans l'horizon Go. Sachant que la solubilité du fer ferreux Fe^{2+} diminue lorsque le PH augmente, **on comprendra que ce dernier est plus mobile dans l'horizon Go et qu'il a tendance à s'immobiliser plus facilement (sous forme de carbonate de fer $FeCO_3$ peu soluble) dans l'horizon Gr.**

C'est l'accumulation de fer ferreux sous forme de carbonate de fer $FeCO_3$ qui donne la couleur gris-bleu uniforme de l'horizon Gr.

Comment remonte le fer au dessus de la nappe profonde des REDUCTISOLS TYPIQUES? :

Lorsque l'humus est un hydromull, aéré et biologiquement très actif (dans la zone de surface, laissée hors d'atteinte de la nappe), la forte production de CO_2 émanant de cet horizon mobilise une partie du fer. En effet, l'eau de pluie entraîne le CO_2 vers le bas du profil lorsque la nappe est à son niveau le plus bas : le CO_2 entraîné solubilise le fer sous forme de bicarbonate de fer $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$. Ce dernier subit ensuite une remontée capillaire. Il précipite dans l'horizon Go sous forme d'hydroxydes ferriques $\text{Fe}(\text{OH})_3$ de couleur rouille au contact de l'oxygène lorsque le sol devient moins humide. L'oxygène est aussi apporté par les pluies.

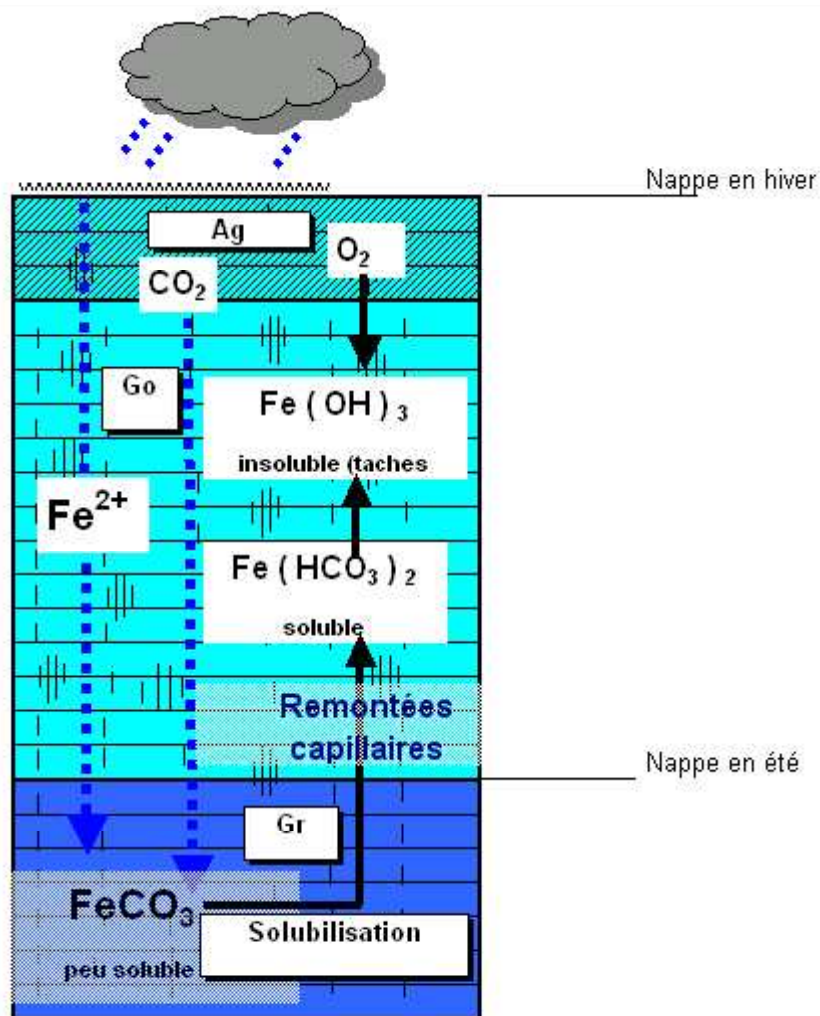


Figure 44 : REDUCTISOL TYPIQUE : processus d'oxydo-réduction et de mobilisation du fer

Potentialités forestières :

La mise en valeur forestière est très dépendante de la profondeur de la nappe permanente : obstacle absolu pour pratiquement toutes les espèces de production si elle reste à proximité de la surface (mise en valeur impossible sans assainissement), elle est au contraire très favorable à l'alimentation hydrique estivale des arbres (essences supportant l'engorgement temporaire de surface) dès qu'elle descend à 40 cm de profondeur et plus (frênes, peupliers). Dans ce cas, le drainage artificiel peut être défavorable.

La végétation naturelle est une association spécialisée hygrophile : aulnes glutineux, grands carex (Carex pendula), joncs, etc.

L'épicéa de Sitka a souvent été utilisé dans les années 60 à 80 afin de valoriser ces sols en terme de production forestière.

6.4.2. REDOXISOLS (les « véritables » pseudogleys de la CPCS)

Par opposition à ce que l'on pourrait appeler des « REDOXISOLS secondaires » (tels les LUVISOLS-REDOXISOLS) qui couvrent de très grandes superficies sur matériaux divers (limons éoliens, altérites), les REDOXISOLS « primaires » sont peu fréquents. On ne les observe que sur les dépôts alluviaux et / ou colluviaux, présentant une discontinuité texturale propre à générer la formation d'une nappe perchée. Celle-ci, outre la pluie, peut être alimentée par des apports latéraux provenant des versants situés en amont.

Solum-diagnostique :

Les REDOXISOLS présentent un horizon g débutant à moins de 50 cm de profondeur.

Une information complémentaire doit être apportée quant à la nature du plancher imperméable qui peut être un matériau meuble (horizon C) ou une roche dure.

Le solum est du type : Ag / g / C ou R

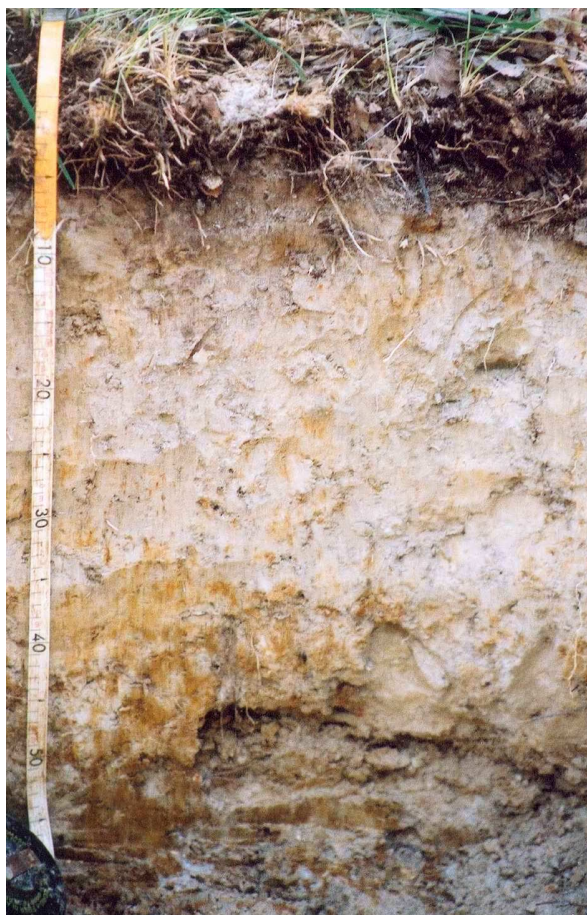


Figure 45 : REDOXISOL – Forêt de Rambouillet (78) - 2003

Le fer est mobilisé à l'état ferreux pendant les périodes où la nappe existe. Ensuite, après avoir migré sur de courtes distances, il précipite après réoxydation lors de la disparition de la nappe en formant des taches rouille ou des concrétions. A noter que des concrétions ferromanganiques Fe-Mn de couleur noire peuvent également se former également par précipitation.

Potentialités forestières :

Au plan forestier, les horizons rédoxiques g ou -g ne représentent que rarement un obstacle absolu à l'enracinement des arbres. Les potentialités forestières des REDOXISOLS peuvent donc rester excellentes (dépendant plus de leur réserve en eau et de leur niveau trophique que de l'hydromorphie), sauf lorsque la durée de l'engorgement devient très longue (jusqu'en juin) et le niveau de saturation proche de la surface. Dans ces derniers cas, se poseront des problèmes de choix d'essences résistantes à l'excès d'eau, de stabilité des arbres et de renouvellement des peuplements. Billonnage et assainissement ne sont utiles que dans ces cas précis.

Des végétaux tels que molinie (qualifiée souvent à tort d'hygrophile), la bourdaine,... sont résistants à l'asphyxie. Parmi les arbres, les chênes pédonculés (sols à réserve en eau suffisante en été) ou sessiles, les trembles, sont les mieux adaptés. Des résineux peuvent être employés : Pin sylvestre, Pin maritime, Epicéa commun.

6.4.3. Autres REFERENCES

Il s'agit de sols ayant en plus des caractères hydromorphes, des caractères importants relatifs à d'autres processus de pédogenèse (lessivage , podzolisation,...).

Nous n'en présenterons ici qu'un exemple (figure 46) : il s'agit d'un LUVISOL-REDOXISOL.

Lorsque les signes d'hydromorphie apparaissent à moins de 50 cm de profondeur dans les sols les plus acides et les plus évolués (LUVISOLS - REDOXISOLS,...), des problèmes peuvent apparaître :

- les racines absorbantes, peu profondes, peuvent buter sur l'horizon BTg ;
- ces racines peuvent être soumises à une asphyxie partielle quand la nappe existe, mais peuvent manquer d'eau en période estivale ;
- l'anaérobiose freine l'absorption des ions par les racines au printemps, et le cycle de l'azote est perturbé ;
- des problèmes de stabilité des arbres peuvent survenir.

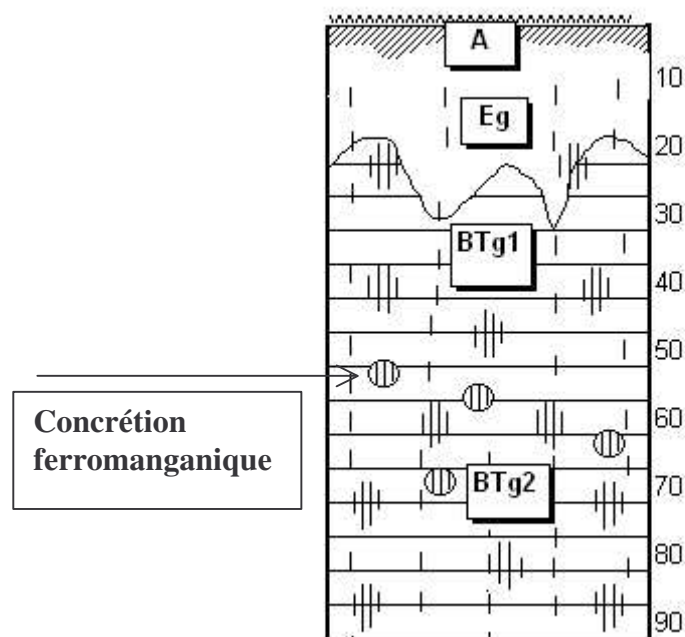


Figure 46 : LUVISOL-REDOXISOL Forêt des Minières (B) – 2002 (voir cd rom)

VII. SOLUMS A APPAUVRISSEMENT SUPERFICIEL EN ARGILE ET PRESENTANT UNE HYDROMORPHIE PAR IMBIBITION CAPILLAIRE

Il s'agit de sols constitués d'un matériau d'origine riche en éléments fins (argile), soumis à une saturation des pores capillaires en saison humide, et à un appauvrissement plus ou moins accentué des horizons de surface. Des nappes superficielles très éphémères peuvent, de ce fait, apparaître au sommet du profil ; **les processus d'oxydo-réduction sont souvent peu marqués** ; par contre, la structure de l'horizon S subit d'importantes variations saisonnières, en relation avec les alternances de gonflement et de retrait des argiles.

1. Les PELOSOLS (Pélosols, CPCS) :

A) Généralités - Pédogenèse :

Il s'agit de sols très riches en argile (généralement plus de 40 à 50 %) avec, en outre, une grande abondance de limons fins.

Cependant, tous les sols argileux ne sont pas des PELOSOLS. En effet, ces derniers doivent posséder les caractères spécifiques suivant :

- Faible évolution des minéraux argileux ;
- Comportement structural particulier, défavorable à l'agriculture.

La quantité d'argile considérable constitue un frein à l'évolution de ces sols et à l'altération de la roche-mère. Lorsque la roche-mère est calcaire, la partie supérieure du solum est décarbonatée. La libération du fer est inférieure à celle observée chez les BRUNISOLS.

Il s'agit donc de sols assez jeunes qui se sont encore assez peu différenciés de leur roche-mère qui est riche en éléments argileux.

La grande richesse en argile de ces sols peut s'expliquer comme suit :

- forte teneur en argile de la roche-mère : il y aurait donc accumulation relative d'argile dans l'horizon S (suite par exemple à une décarbonatation de la roche-mère) ;
- argilogenèse (formation d'argile) suite à la division de minéraux de la taille des limons fins.

Ces sols ne sont que très légèrement appauvris en argile en surface. Ce sont des sols très difficiles à travailler mais riches. La texture argileuse limite la profondeur de l'enracinement . En hiver, il n'y a pas de nappe perchée (sols très peu perméables dû à l'abondance d'argile, favorisant un ruissellement important en surface) mais les fins capillaires qui se forment dans l'argile s'engorgent d'eau, provoquant l'asphyxie temporaire.

En été, suite au retrait des argiles, s'ouvrent de larges et profondes fissures, les PELOSOLS peuvent alors se désécher profondément dans les périodes chaudes et sèches.

En Lorraine (plateau), les PELOSOLS sont voués à la prairie et à la forêt de chêne pédonculé et charme. Le frêne y donne souvent de bons résultats.

B) Horizon de REFERENCE (Sp):

L'horizon Sp est obligatoire. De plus de 30 cm d'épaisseur, il est très argileux (plus de 45 % d'argile). Il présente à l'état humide une structure polyédrique anguleuse bien développée et une sur-structure prismatique ou polyédrique grossière bien visible en période sèche. Les fentes de retrait sont bien marquées en été. Cet horizon n'est jamais calcaire, même sur roches-mères calcaires ; il peut être encore saturé ou plus ou moins insaturé. Le passage à l'horizon C est progressif (horizon S-C).

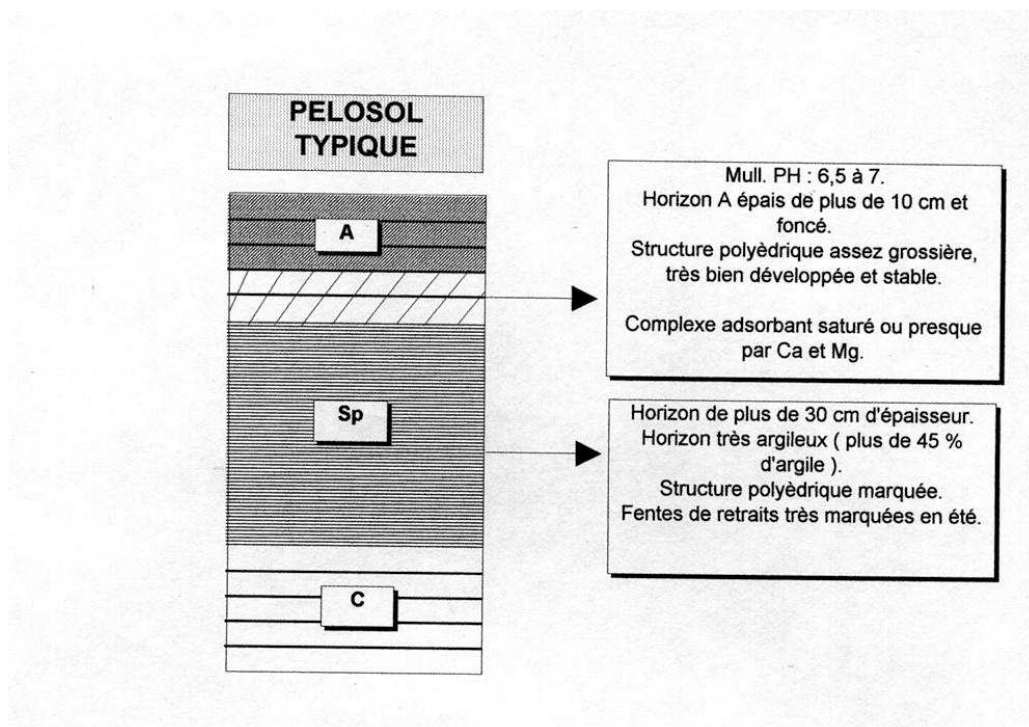
Un horizon E existe dans certains cas : il doit alors contenir moins de 30 % d'argile et ne doit pas excéder 30 cm d'épaisseur.

Des signes d'hydromorphies (taches de rouille) peuvent être présents.
Les roches-mères peuvent être des marnes ou des argiles sédimentaires, des schistes argileux, des argiles calcaires, etc.

C) REFERENCES :

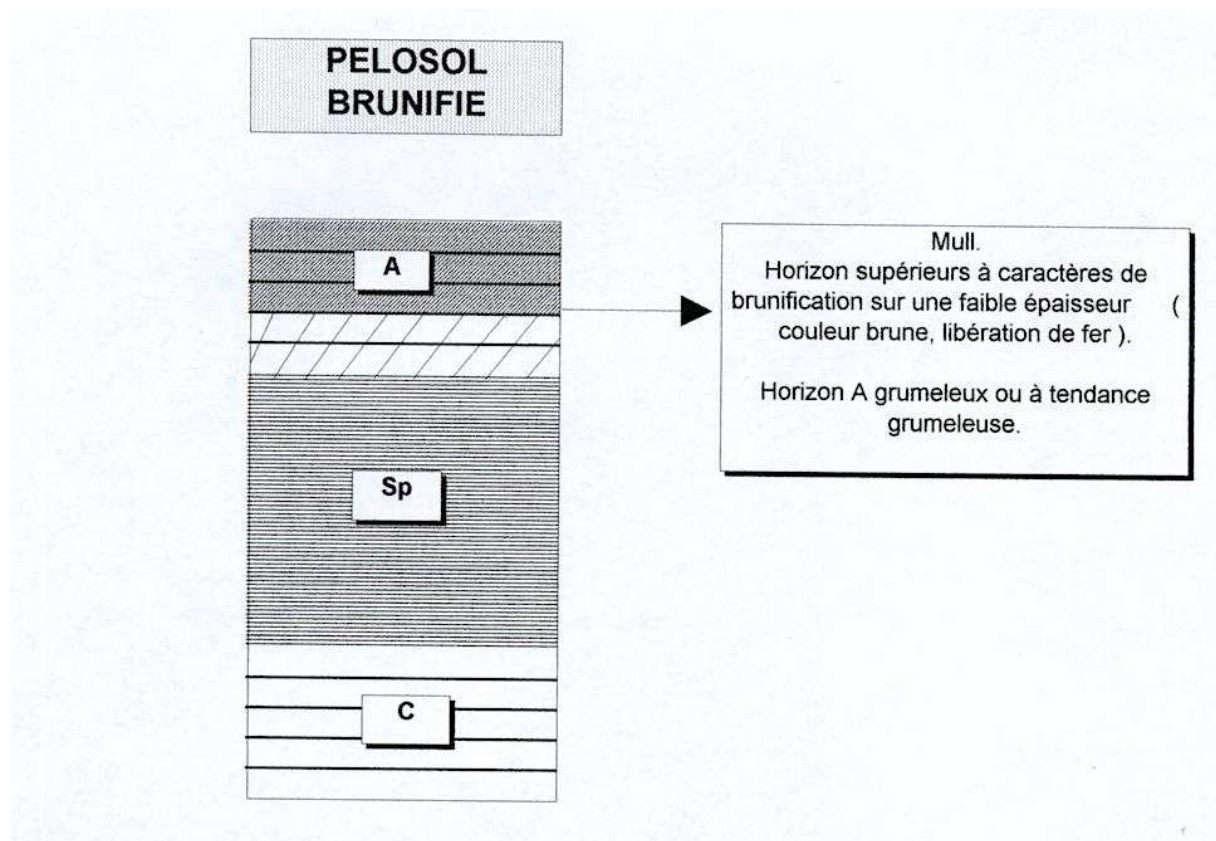
A) PELOSOL TYPIQUE :

- souvent situés en positions de pentes assez fortes,
- texture argileuse dans tous les horizons ,
- signes d'hydromorphie discrets ou absents ,
- horizon A épais de plus de 10 cm et foncé, l'humus est un mull à structure polyédrique assez grossière, très bien développée et stable ,
- complexe adsorbant saturé ou presque par Ca et Mg ,
- faible altération des minéraux en Sp.



B) PELOSOL BRUNIFIE :

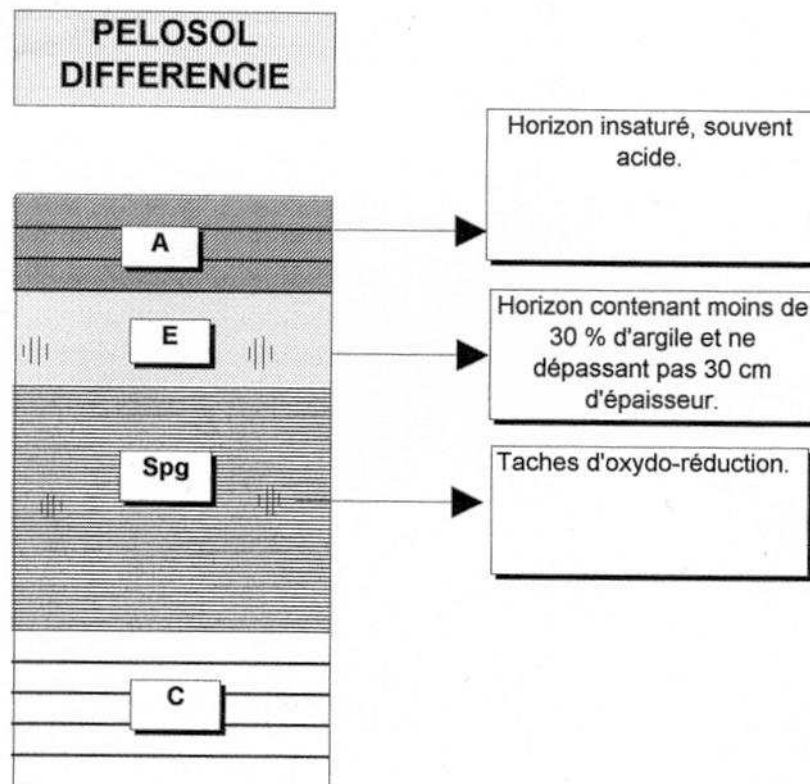
- texture argileuse dans tous les horizons,
- horizons supérieurs à caractères de brunification sur une faible épaisseur (couleur brune, libération de fer) ,
- horizon A grumeleux ou à tendance grumeleuse, l'humus est un mull.



C) PELOSOL DIFFERENCIE :

- texture de l'horizon de surface (A, E) : limoneuse ou limono-argileuse (moins de 30 % d'argile) ; grande richesse en limons,
- des engorgements temporaires se manifestent à la base du A ou du E, donc à faible profondeur et provoquent des difficultés d'implantation, de survie et de croissance aux essences forestières,
- horizon de surface insaturé, souvent acide,
- horizon Sp à taches d'oxydo-réduction (Spg).

Ces sols sont parfois appelés PELOSOLS à deux couches à cause de la présence d'une couche à texture plus ou moins limoneuse recouvrant l'horizon Sp argileux.



2. Les PLANOSOLS (Planosols, CPCS)

A) Généralités :

Leur solums est beaucoup plus tranché que les PELOSOLS, avec un horizon E nettement appauvri en argile.

Dans tous les cas, un grand contraste existe entre :

- des premiers horizons supérieurs perméables qui sont saisonnièrement le siège d'excès d'eau, et présentent donc des caractères rédoxiques (-g).
- un horizon plus profond (BT ou S) dont la perméabilité est très faible ou nulle et formant un « **plancher** ».

Ces sols sont souvent le siège de nappes perchées temporaires à écoulement essentiellement latéral.

En général, les PLANOSOLS cumulent les 4 caractères ci-dessous :

1) **Forte différenciation texturale** entre horizons supérieurs peu argileux, assez perméables, et horizons plus profonds, beaucoup plus argileux et très peu perméables (= plancher) :

- la différence entre taux d'argile au sein du solum doit être d'au moins 20 % ;
- l'horizon E le moins argileux ne doit pas excéder 30 % d'argile ;
- l'horizon le plus argileux du solum doit avoir au moins 25 % d'argile.

2) Entre horizons supérieurs E et horizons plus profonds, il y a **changement textural brusque** : en moins de 8 cm comptés verticalement, on passe de :

- si moins de 20 % d'argile en E : à plus du double (exemple : de 18 à plus de 36 % d'argile)
- si plus de 20 % d'argile en E : à plus de $x + 20$ % d'argile (exemple : de 25 à plus de 45 % d'argile).

3) Le **contact textural doit être sub-horizontale**, ce qui exclut un contact en glosses (langues) larges et profondes mais ce qui n'empêche pas une certaine « dégradation morphologique » du sommet du plancher sous la forme de petites glosses étroites (figure 17 ci-dessous).

4) Saisonnièrement, les horizons E sont (au moins en partie) **le siège de nappes perchées temporaires à écoulement essentiellement latéral**. Il en résulte des phénomènes d'oxydo-réduction qui se marquent morphologiquement par des décolorations et / ou des taches de rouille.

B) Pédogenèse et horizons de référence :

Le seul horizon de référence exigé est Eg. Le « plancher » (changement textural brusque) doit apparaître à une profondeur maximale de 120 ± 20 cm.

On distingue deux types de PLANOSOLS : les PLANOSOLS « pédomorphes » et les PLANOSOLS « sédimorphes ». Ces deux types de PLANOSOLS ont des origines pédogénétiques différentes :

a) PLANOSOLS « pédomorphes » :

Dans ces sols, se différencient au cours du temps, progressivement, des horizons supérieurs de plus en plus pauvres en argiles (horizons E). Trois processus distincts peuvent intervenir (susceptibles de se succéder) pour aboutir à ces PLANOSOLS « pédomorphes » :

- une illuviation verticale d'argile (solum Eg / BTg),
- une perte d'argile en surface par migration latérale (« appauvrissement » latéral : solum Eg / Sg),
- une dégradation géochimique de certains minéraux argileux sous l'effet des phénomènes d'oxydo-réduction (solum Eg / Sg).

b) PLANOSOLS « sédimorphes » :

La forte différenciation texturale résulte ici de la pré-existence de deux couches sédimentaires superposées. Dans un tel cas, le solum diagnostique est : Eg / II S .

C) Propriétés et fonctionnement :

Le fonctionnement hydrique est caractérisé par des engorgements saisonniers, intenses mais parfois fugaces, par des nappes perchées superficielles temporaires qui circulent rapidement et s'évacuent latéralement au contact du « plancher » peu perméable.

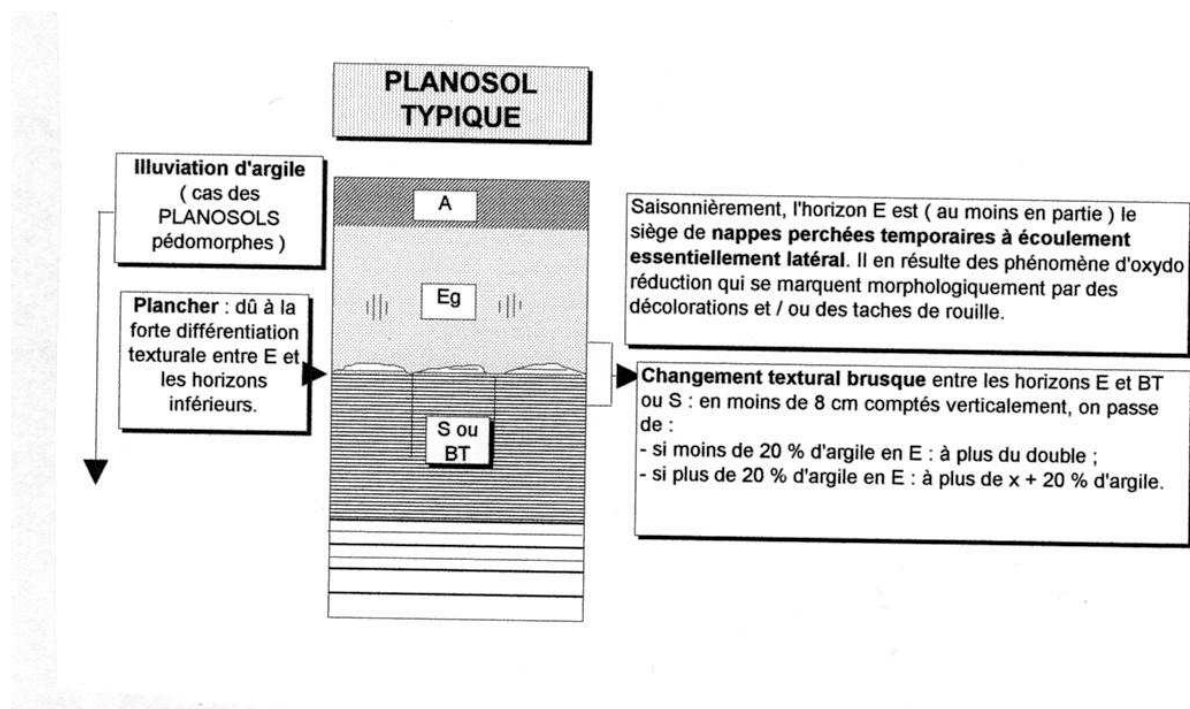
Paradoxalement, les PLANOSOLS sont à la fois trop humides en hiver et au printemps et trop secs en été : le mauvais enracinement des plantes, suite aux excès d'eau d'hiver et de printemps, accroît encore leur caractère « séchard ».

La mise en valeurs des PLANOSOLS pose problèmes. Les horizons de surface sont souvent à structure instable, à faible réserve hydrique et engorgés une partie de l'année alors que les horizons sous-jacents sont souvent compacts, difficilement pénétrables par les racines et par l'eau.

A certains moments, les horizons de surface sont à l'état réduit ; ils sont appauvris en argile et en fer, parfois à forte acidité. Leur fertilité chimique est donc faible. Quant aux horizons profonds argileux (et souvent compacts), ils présentent un réservoir utilisable pour l'eau restreint, suite à leur faible porosité « utile ». Leur richesse minérale est parfois grande, mais peu disponible. Dans certains cas, l'abondance de l'aluminium échangeable peut occasionner des toxicités.

D) REFERENCES :

Nous ne présenterons ici qu'une Référence : les PLANOSOLS TYPIQUES.
Ces sols possèdent un horizon Eg débutant à moins de 50 cm de la surface :



E. Exemple :

EXEMPLE TYPE

G 2

STATION : SC9

Sous-type : b

Relevé n° : 73

Localisation : Forêt domaniale d'Orléans, massif de Lorris, parcelle 128.

Topographie : Versant, pente moyenne (3,5 %), exposition sud-ouest.

Substrat : Formations de Sologne.

Peuplements forestier : Futaie mixte de chêne sessile et de pin sylvestre.

Végétation : Date du relevé : 18 juin 1987.

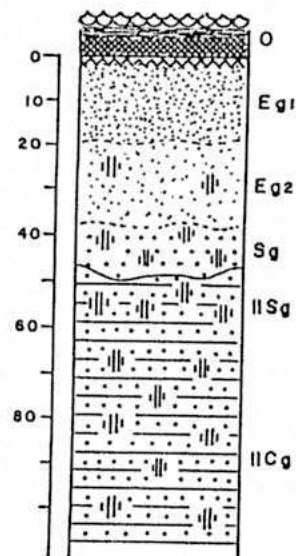
Recouvrement des strates : A : 75 %, a : 5 %, h+m : 100 %

Strate arborescente : *Quercus sessiliflora* 4, *Pinus sylvestris* 2, *Betula pendula* 1.
Strate arbustive : *Sorbus torminalis* 1.

Groupes écologiques :

G.E. 6a : *Hedera helix* +.
G.E. 7 : *Rubus fruticosus* +, *Thuidium tamariscifolium* 1.
G.E. 10a : *Betula pendula* 1, *Sorbus torminalis* 1, *Lonicera periclymenum* +, *Polytrichum formosum* +.
G.E. 11 : *Deschampsia flexuosa* +, *Carex pilulifera* +, *Hypnum cupressiforme* 1, *Dicranum scoparium* +.
G.E. 13a : *Calluna vulgaris* 1, *Pleurozium schreberi* +, *Leucobryum glaucum* +.
G.E. 13b : *Molinia caerulea* 5.

PLANOSOL



- O Horizon OL et OF réguliers mais peu épais, OH épais (3 à 5 cm), brun-noir (5 YR 2/1 puis 1,7/1), gorgé d'eau, structure continue, transition peu nette. Humus de forme hydromor.
- A Liseré brun-rouge foncé (5 YR 4/2), très humide, structure continue, enracinement assez abondant, transition rapide.
- Eg1 0-1 cm Fond gris clair (2,5 Y 6/1 et 10 YR 7/2) et taches brun-gris violacé (5 YR 5/2 à 6/2) chacun pour moitié, texture sableuse, structure continue, meuble, enracinement assez abondant fin et moyen, absence de taches ocre, transition rapide.
- Eg2 1-20 cm Beige pâle (2,5 Y 7/1 puis 8/1), très peu de taches ocre (2 %), texture sableuse, structure continue, enracinement encore correct, transition rapide.
- Sq 20-38 cm Beige clair (10 YR 7/2), assez nombreuses (25 puis 30 à 35 %) taches ocre à ocre-rouille, texture sableuse localement faiblement argileuse, structure polyédrique friable, moyennement compact, enracinement faible, transition nette faiblement ondulée.
- II Sq 38-49 cm Argile sableuse, fond beige clair (10 YR 7/1 à 7/2) et nombreuses taches brun-ocre et ocre-rouille (30 %), structure polyédrique moyenne (agrégats de 1 à 3 cm), compact, enracinement très faible, localisé dans les fentes de retrait et formant un feutrage sur les parois, transition progressive.
- II Cg 49-60 cm Argile sableuse gris olive (5 Y 7/2 et 6/1), nombreuses taches ocre et ocre-rouille (30 %) et quelques veines plus ou moins verticales gris-bleu (7,5 GY 7/1) le long des racines, structure polyédrique grossière, compact, enracinement faible formant des feutrages plaqués sur les unités structurales.
- > 60 cm

Horizon	Profondeur (cm)	% M.O.	% de C	% de N	C / N	PH eau	PH KCl	Ca (meq / 100 g)	Mg (meq / 100 g)	K (meq / 100 g)	C.E.C. (meq / 100g)	S /
Eg1	10	1,53	0,89	0,042	21,2	5,0	3,9	0,3	0,08	0,087	2,3	
Eg2	25-35	0,64	0,37	0,010	37,0	5,0	4,1	0,5	0,12	0,059	2,3	
II Sg	50-60					4,7	3,5	2,4	1,57	0,227	12,7	
II Cg	80-90					4,9	3,4	5,1	2,25	0,185	14,5	

PLANOSOL TYPIQUE

Analyse chimique

GRANULOMETRIE en %

Horizon	Profondeur (cm)	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier
Eg1	10	9,5	11,6	7,1	17,4	54,4
Eg2	25-35	9,2	10,3	5,8	14,7	60
II Sg	50-60	32,1	5,7	3,1	8,8	50,3
II Cg	80-90	29,9	10,4	7,8	8,4	43,5

PLANOSOL
TYPIQUE

ANALYSE
GRANULOMETRIQUE

Forte différenciation texturale :

- la différence entre taux d'argile au sein du solum doit être d'au moins 20 % ;
- l'horizon E le moins argileux ne doit pas excéder 30 % d'argile ;
- l'horizon le plus argileux du solum doit avoir au moins 25 % d'argile.

VIII. Solums très humifères : Les ORGANOSOLS

Les ORGANOSOLS sont constitués uniquement d'horizons organiques O et / ou d'horizons Ah hémiorganiques (contenant plus de 8 % de carbone organique), en milieu aérobie (bien aéré) bien ou assez bien drainé. Ces horizons ont, au total, plus de 10 cm d'épaisseur.

Solum diagnostique :

O / C ou R

ou

O / Ah / C ou R

ou

Ah / C ou R

Ah contenant plus de 8 % de carbone organique.

De minces horizons E, S, BP,... sont tolérés mais ils doivent faire moins de 10 cm d'épaisseur au total et l'ensemble des horizons O + Ah doit avoir une épaisseur supérieure au double de celle de ces horizons.

REFERENCES :

1) ORGANOSOLS CALCAIRES (Sols humocalcaires, CPCS)

On les rencontre sous forêt subalpine résineuse, ou montagnarde mixte (sapin, épicéa, hêtre dans les Alpes). Sous climat de montagne froid et humide, les solums carbonatés deviennent exceptionnellement humifère (à cause des forts contrastes saisonniers), et perdent très vite leur calcaire actif (sauf sur éboulis calcaires constamment renouvelés) ; le plus souvent, un squelette calcaire grossier subsiste seul dans le profil.

Les ORGANOSOLS CALCAIRES sur éboulis instables de bas de pente, ont les caractères des RENDOSOLS de plaine, en plus humifères (plus de 8 % de carbone organique dans l'horizon A) et en plus profonds (80 cm à 1 m).

Ces sols comportent un horizon Acah (à plus de 8 % de carbone organique), ou bien seulement des horizons O à éléments grossiers calcaires. Si le taux de carbone dans l'horizon Acah est inférieur à 8 %, le solum doit être rattaché aux RENDOSOLS humifères par exemple ou à une autre Référence.

2) ORGANOSOLS CALCIQUES (Sols humocalciques, CPCS)

Ce sont des ORGANOSOLS non carbonatés dont le complexe adsorbant de l'horizon Ah est saturé ou sub-saturé (S / T supérieur à 80 %) et le rapport Ca / Mg est supérieur à 5.

On les rencontre également sous forêt subalpine résineuse, ou montagnarde mixte (sapin, épicéa, hêtre dans les Alpes).

3) ORGANOSOLS INSATURES

Ce sont des ORGANOSOLS non carbonatés dont le rapport S / T est inférieur à 80 % sur au moins 20 cm à partir de la surface du sol.

Si le taux de carbone dans l'horizon Ah est inférieur à 8 %, le sol devra être rattaché à une autre Référence, aux RANKOSOLS par exemple.

4) ORGANOSOLS TANGELIQUES :

L'horizon de Référence obligatoire est un Ohta très épais. L'Ohta (horizon de tangel) est un horizon organique de consistance grasse et tachant les doigts constitué de déjection animales. Il correspond à des milieux aérobies à activité faunique (vers de terre,...) importante mais en conditions climatiques contraignantes (altitude). Le PH est de l'ordre de 5,5 à 7 sur roche-mère calcaire.

Solum diagnostique :

OL / OF / Ohta (de 5 à 45 cm d'épaisseur) / Rca (roche calcaire)

Les deux premiers horizons OL et OF ont tendance à devenir plus épais (quelques cm) en altitude et dans les climats plus froids.

Les ORGANOSOLS TANGELIQUES sont fréquents dans les forêts des montagnes humides (Jura, Alpes, Pyrénées). Ils occupent les positions de plateaux ou de faibles pentes.

Le climat est humide et suffisamment chaud et humide pour fournir une biomasse importante. L'optimum correspond aux plateaux du Jura avec 1500 à 2500 mm de précipitations moyennes annuelles, l'absence de toute saison sèche et une température moyenne annuelle de $8^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$. La végétation est une forêt de conifères (épicéas, sapins) et de hêtres, tilleuls avec sous-bois de myrtilles, fougères, etc.

Ces sols sont réservés à la forêt. Ils ont, en climat humide et lumineux, une très bonne productivité (jusqu'à 20 mètres cubes / ha / an). Ils sont sensibles à l'érosion. Sous-bois de myrtilles (cueillette). La circulation est en général très difficile.

Les ORGANOSOLS TANGELIQUES occupent fréquemment des zones karstiques caractérisées par des calcaires durs à réseaux de « lézines » (fissures profondes, 10 à 20 cm de large sur plusieurs mètres de profondeur). Ces fissures sont remplies par des matériaux holorganiques plus ou moins saturés en bases, qui conditionnent la fertilité du milieu dans son ensemble.

IX. Solums peu ou pas évolués :

Ce sont des sols à faible degré d'évolution : la matière organique est peu abondante, le solum reste peu coloré (peu de fer libre), il ne se forme pas ou peu de complexes organo-minéraux permettant l'élaboration d'une structure.

On regroupe ici les sols « jeunes », de climats humides, qui représentent des stades initiaux d'un certain type de pédogenèse (sols d'érosion ou d'apport), soit des sols dont l'évolution est empêchée par un facteur climatique : climat tantôt trop froid (CRYOSOLS), tantôt trop secs (déserts), pour que l'altération chimique puisse se produire : seule une désagrégation mécanique du matériau parental peut intervenir.

On distingue :

- Sols peu évolués climatiques :
 - sols de déserts et péri-désertiques ;
 - sols de climat arctique : **CRYOSOLS**.
- Sols peu évolués sur matériaux récents :
 - sols d'érosion : **LITHOSOLS, PEYROSOLS, REGOSOLS**.
 - sols d'apport :
 - ❖ alluvial :
 - FLUVIOSOLS** (sols alluviaux fluviaux).
 - THALASSOSOLS** (sols alluviaux marins et fluvio-marins).
 - ❖ colluvial :
 - COLLUVIOSOLS**

9.1. Sols d'érosion :

Ce sont des sols résultant du décapage des sols de fortes pentes. Seule une petite couche de matière organique, forme un mull ou un moder peu épais, et peut apparaître en surface ; elle est même absente sur les sols à trop forte pente.

1) Les **REGOSOLS** (Régosols, CPCS) :

Ce sont des solums très minces comportant à moins de 10 cm de profondeur un matériau non ou très peu évolué, non différencié, meuble ou peu dur (c'est-à-dire cohérent mais approfondissable avec des outils), sans contact lithique à moins de 50 cm de la surface.

Solum diagnostique : n'importe quel horizon pédologique au-dessus d'une couche M à l'exclusion des dépôts alluviaux très récents pour lesquels on parlera de FLUVIOSOLS BRUTS.

2) Les LITHOSOLS (Lithosols, CPCS) :

Ce sont des solums limités en profondeur par un matériau cohérent, dur et continu (roche non altérée ou horizons pédologiques durcis) à 10 cm de la surface ou moins.

3) Les PEYROSOLS :

La présence, dès la surface et sur une épaisseur importante, de pierres et / ou cailloux en grande abondance, est une contrainte majeure à l'utilisation agricole d'un sol. Lorsque pierres et / ou cailloux dépassent un certain taux, la priorité sera donnée à ces éléments très grossiers et le rattachement se fera à l'une ou l'autre des références de PEYROSOLS.

Rappels préalables :

Les éléments lithiques de dimensions comprises entre 0,2 et 2 cm sont appelés graviers. Ceux compris entre 2 et 7,5 cm sont appelés cailloux. Ceux compris entre 7,5 et 20 cm sont des pierres. Au delà de 20 cm, on parlera de blocs. Les teneurs en cailloux, pierres et blocs seront exprimées en poids et en % par rapport à la terre brute totale séchée à l'air.

Solum diagnostique :

Présence d'un ou plusieurs horizons comprenant des taux de cailloux et / ou pierres supérieurs à 60 % de la terre brute totale.

Si le taux de pierres est supérieur à 40 % de la terre brute totale, il s'agit d'un horizon pierrique (noté Xp). Si ce taux de pierres est inférieur à 40 %, il s'agit d'un horizon cailloutique (noté Xc).

Pour être rattaché aux PEYROSOLS, un solum doit être constitué, sur plus de 50 cm⁶ à partir de la surface, par des horizons pierriques ou cailloutiques (Xp ou Xc). Les espaces entre les éléments très grossiers peuvent être vides ou occupés par de la terre fine.

S'il s'agit principalement d'horizons pierriques, on parlera de PEYROSOLS PIERRIQUES.

S'il s'agit plutôt d'horizons cailloutiques, on parlera de PEYROSOLS CAILLOUTIQUES.

Roche-mère : toute roche dure, désagrégée in situ ou par transport (éboulis, alluvions torrentielles, moraines,...).

⁶Si moins de 50 cm, on ajoutera le qualificatif « leptique » au nom du sol.

9.2. Sols d'apport alluvial :

9.2.1. Les FLUVIOSOLS :

Ces sols de dépôts récents des vallées se distinguent par trois caractères principaux :

- ils occupent toujours une position basse dans les paysages : celle des vallées où ils constituent le lit des rivières.
- ils sont développés dans des matériaux récents, les alluvions fluviatiles.
- ils sont marqués par la présence d'une nappe phréatique permanente ou temporaire, à fortes oscillations et ils sont inondables en période de crues.

Il ne faut pas confondre les sols alluviaux proprement dit, avec les dépôts d'alluvions anciennes des terrasses, dépourvues de nappe, et qui constituent un matériau pour des sols évolués.

A) Caractéristiques principales :

a) Matériau :

Souvent, il s'agit d'un matériau relativement fin (argile, sable, limon) reposant sur un matériau grossier (la grève alluviale) dans lequel circule une nappe phréatique. La texture peut varier beaucoup avec la profondeur suivant les types d'alluvionnement successifs.

b) Evolution :

Faible ou nulle ; elle peut se traduire par de faibles altérations et redistributions du fer, des sels, du CaCO_3 ,...

c) Caractères hydromorphes :

De nombreux fluviosols connaissent des engorgement à des degrés divers. On note toujours la présence d'une nappe souterraine plus ou moins profonde selon le cas et les saisons.

Comme la nappe est riche en oxygène (nappe circulante), les effets négatifs sur la végétation sont atténués.

B) Horizons de Référence :

Dans les FLUVIOSOLS, il n'existe pas d'horizons de référence spécifiques mais on peut y reconnaître notamment :

- des horizons A typiques ou atypiques (horizons Js) ;
- des horizons S assez typiques (FLUVIOSOLS BRUNIFIES) ou atypiques (horizons Jp) ;
- des couches M et très souvent des couches D (grève alluviale).

Les horizons atypiques ou jeunes Js et Jp sont des horizons très peu différenciés. Les processus d'altération (décarbonatation, libération du fer,...) et de redistribution interne de matière (argile, fer, carbonates) sont à peine amorcés et peu visibles.

C) Références :

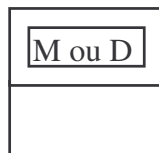
a) FLUVIOSOLS BRUTS :

Matériaux d'apport fluviaux en général grossiers (sables et cailloux) à l'état brut (ou presque) inclus dans le lit mineur des rivières (bancs, îlots temporaires, berges,...). Ils sont souvent mal stabilisés et toujours recouverts en période de hautes eaux.

La couche la plus superficielle peut contenir des traces de matière organique incorporée mais il n'existe pas de véritable horizon pédologique.

Solum diagnostique :

couches M ou D



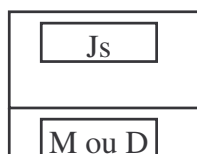
Les FLUVIOSOLS BRUTS peuvent supporter une végétation arbustive caractéristique (saulaie, aulnaie).

b) FLUVIOSOLS TYPIQUES :

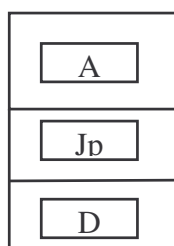
Développés dans des matériaux d'apports fluviaux récents qui occupent le lit majeur des rivières, ils sont soumis aux inondations en période de crues desquelles la sédimentation se poursuit encore actuellement. Faute de temps, la pédogenèse n'a pas encore pu se manifester. Il s'agit donc de sols peu évolués et peu différenciés sans véritable horizon S.

Les FLUVIOSOLS TYPIQUES correspondent à trois solums diagnostiques :

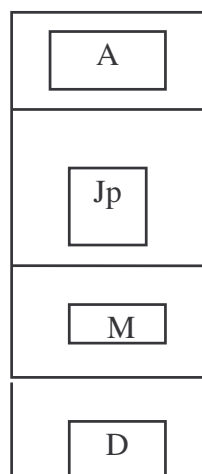
1. Js / M ou D : Solums peu épais (moins de 30 cm), peu évolués où l'horizon Js repose directement sur la couche M ou D (grève alluviale). Ils ne présentent pas d'horizons Jp. Ils peuvent contenir une forte proportion de matériaux grossiers issu de la couche D. Ces solums sont plus fréquents en amont des vallées qu'à l'aval.



2. A / Jp / D : Solums moyennement profonds (30 à 80 cm) comprenant un horizon A typique et un horizon « jeune » de profondeur (Jp) reposant directement sur la couche D par une transition parfois progressive mais le plus souvent par un contact abrupt et ondulé.



3. A / Jp / M / D : Solums profonds (plus de 80 cm) où l'horizon Jp surmonte une couche M plus ou moins épaisse constituée d'un matériau d'apport alluvial de granulométrie variable mais fine. Cette couche M repose sur une couche D située le plus souvent à plus d'un mètre de profondeur.



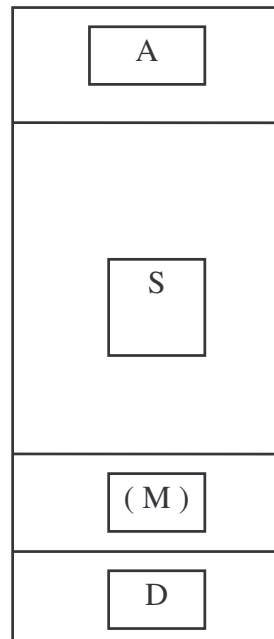
Ces deux derniers solums sont plus fréquents dans la zone aval des rivières que dans le secteur amont.

Les propriétés des FLUVIOSOLS TYPIQUES sont celles des FLUVIOSOLS en général.

Leur potentialités agronomiques et forestières vont en croissant du premier solum vers le troisième, notamment en raison des possibilités plus favorables de réserve en eau et d'enracinement, à condition cependant que celles-ci ne soient pas entravées par des phénomènes d'engorgement plus fréquents dans le solum 3.

Potentialités forestières : culture du peuplier si le sol est suffisamment profond.

c) FLUVIOSOLS BRUNIFIES :



Développés dans des matériaux d'apport fluviatiles récents, ils occupent le lit majeur des rivières et sont soumis aux inondations au cours desquelles une sédimentation fine se produit encore actuellement. Ils sont souvent argileux ou argilo-limoneux, riches en matières organiques et présentent l'aspect des sols brunifiés à horizon S bien exprimé.

Solum diagnostique :

A / S / D ou A / S / M / D

Ce sont des solums profonds (1 m ou plus) possédant en dessous de l'horizon A un horizon bien structuré, biologiquement actif, bien pourvu en matière organique (le taux de carbone peut être supérieur à 2 %) ayant tout à fait les caractères d'un horizon S typique. Cet horizon recouvre, une couche M qui peut être épaisse ou repose directement sur une couche D (grève alluviale).

Ces solums sont les plus fréquents dans les grandes vallées alluviales en zone médiane et aval du profil en long des rivières. Ils peuvent présenter des caractères d'engorgement plus ou moins accentués mais ceux-ci sont souvent atténués par le fait que la nappe alluviale et les eaux d'inondation sont circulantes et oxygénées.

Les propriétés des FLUVIOSOLS BRUNIFIES sont celles des FLUVIOSOLS TYPIQUES en général. Il faut toutefois ajouter que :

- leur potentialités sont très élevées ;
- bien que souvent lourds et difficiles à travailler, ils sont souvent mis en culture sauf pour les types rédoxiques et réductiques.

Potentialités forestières : culture du peuplier.

9.2.2. Les THALASSOSOLS

Ce sont des solums développés dans les formations d'apports marins ou fluvio-marins, situés à des altitudes voisines de celles de la mer, peu différenciés.

On les rencontrent par exemple le long de la Manche (Baie du Mont Saint-Michel), de l'Océan Atlantique (Marais Poitevin, rives de la Gironde, Iles de Ré et de Noirmoutier) et de la Méditerranée (étangs du Languedoc et du Roussillon).

9.3. Sols d'apport colluvial : Les COLLUVIOSOLS.

Les colluvions sont des formations superficielles particulières de versants qui résultent de l'accumulation progressive de matériaux pédologiques, d'altérites ou de roches meubles arrachées plus haut dans le paysage. Ces matériaux ont été transportés le plus souvent par ruissellement sur de courtes distances selon les lignes de plus grandes pentes d'un versant. Le colluvionnement ne peut exister qu'à condition que la couverture végétale ne soit pas continue.

Les COLLUVIOSOLS sont définis par leur roche-mère : les colluvions. C'est pourquoi ils occupent des positions particulières dans les paysages :

- parties concaves et en bas des versants ;
- dans les fonds de vallons ;
- en milieu de pentes, à la faveur des replats, etc.

Les colluvions se raccordent souvent aux alluvions soit graduellement (matériaux d'origine mixte), soit par superposition ou interstratification.

A noter aussi que plus on se déplace vers le bas des versants, plus les formations colluviales ont tendance à s'épaissir.

Solum diagnostique :

Une caractéristique des COLLUVIOSOLS est l'indépendance totale du solum colluvial vis-à-vis du matériau sous-jacent.

Il n'y a pas d'horizons de référence spécifiques des COLLUVIOSOLS : les horizons A, Js, Jp, S, C sont les plus fréquents. Les horizons BT et BP sont interdits. **Un solum développé dans des colluvions sera donc rattaché aux COLLUVIOSOLS tant qu'on n'aura pas diagnostiqué le solum caractéristique d'une autre Référence.**

Que faire si l'on diagnostique la présence le solum caractéristique d'une autre Référence ? :

- Si les horizons de surface d'un solum ont été sur-épaissis par colluvionnement, on se rattache à une Référence (autre que COLLUVIOSOLS) et on ajoute le qualificatif « cumulique ». Exemple : LUVISOL TYPIQUE cumulique.
- Si les apports colluviaux qui recouvrent le solum diagnostiqué sont inférieurs à 50 cm d'épaisseur, on ajoute au nom de la Référence le qualificatif « colluvionné en surface ». Exemple : CALCOSOL argilo-limoneux, colluvionné en surface, issu de marne.

- C'est seulement lorsque les matériaux colluvionnés excèdent 50 cm à partir de la surface, qu'on rattache le solum entier aux COLLUVIOSOLS. Dans le cas où le solum enfoui sous les colluvions est reconnaissable, on peut utiliser la formule : COLLUVIOSOL sur une autre Référence. Exemple : CALCOSOL sur FERSIALSOL CALCIQUE.

Propriétés :

Elles varient largement en fonction de la nature des matériaux colluvionnés, de l'importance de la pente, de la position sur le versant, etc. Un certain nombre de caractères fonctionnels particuliers peuvent cependant être cités :

- la dynamique hydrique est essentiellement latérale, qu'il s'agisse de flux superficiels (ruissellements) ou plus profonds ; les COLLUVIOSOLS reçoivent souvent des apports d'éléments en solution, en provenance de la partie haute des versants (Ca, Mg, K, nitrates).
- très souvent, il y a engorgement des parties les plus basses à cause de ruptures de pente et par suite des difficultés d'évacuation des eaux.
- les atterrissements actuels sont toujours possibles dans les parties basses et la reprise d'érosion possible dans les parties hautes.
- le niveau de fertilité est influencé par la nature des matériaux arrachés plus haut : si ces derniers sont pauvres, les colluvions sont très pauvres, s'ils sont riches, elles sont très riches.

X. ANDOSOLS (Andosols, C.P.C.S)

Les ANDOSOLS présentent typiquement des **horizons supérieurs de couleur sombre**, souvent très humifères, et se forment sur **roches-mères volcaniques** (tufs, rhyolites, scories ou cendres volcaniques, ...) à condition que le **climat soit humide** et dépourvu de saison sèche marquée (montagnes arrosées).

L'altération (hydrolyse) de ces roches libère de grosse quantité d'alumine active (généralement amorphe), ce qui va conduire à la formation de complexes humus-alumine. Ce sont ces complexes, qui en s'accumulant, donneront la couleur foncée aux horizons supérieurs, les matières organiques étant fortement stabilisées par ces complexes. Ces deux processus, altération et complexation, sont responsables de l'ANDOSOLISATION.

L'**andosolisation** caractérise les sols contenant de l'**alumine active**. Cette alumine active insolubilise très rapidement les précurseurs humiques, dès leur formation, donnant naissance à une grande quantité d'acides fulviques et humiques. L'alumine exerce, comme on l'a dit plus haut, une forte **action stabilisante des composés humiques**. L'andosolisation s'accompagne également d'une **perte en cations basiques** et de silice soluble par entraînement lent et progressif hors du profil.

Les ANDOSOLS des massifs montagneux tempérés humides (**Massif Central**,...) se comportent généralement en très bons sols de forêts et de prairie (bonne fertilité), surtout les

moins acides. Les réserves en eau utile sont généralement suffisantes. Sur le plan chimique, la nutrition en phosphore et en azote n'est cependant pas toujours bien assurée, surtout dans les ANDOSOLS acides (ALUANDOSOLS), en raison, d'une part de **l'insolubilisation du phosphore** par l'alumine, d'autre part de la **nitrification très lente** et incomplète.

Pour donner un exemple d'ANDOSOL, prenons le cas des ALUANDOSOLS présents dans le MORVAN. Ceux-ci sont les andosols les plus pauvres (oligotrophes) et se présentent comme suit :

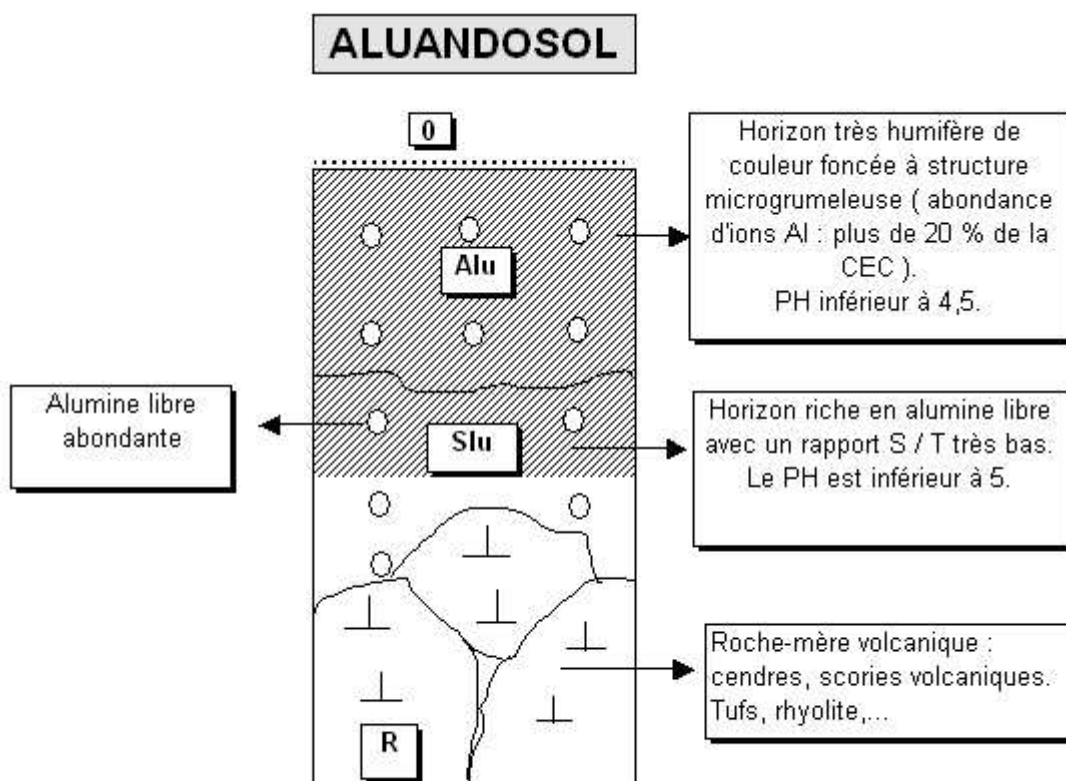


Figure 10 : Schéma type d'un ALUANDOSOL

Horizons de référence :

Alu : Horizon A aluandique :

- Couleur généralement noire ;
- Teneur en carbone organique supérieure à 3 % ;
- PH inférieur à 4,5 ;
- Al^{+++} / CEC supérieur à 20 %.
- Structure microgrumeleuse (abondance d'ions Al^{+++} complexants) .

Slu : Horizon S aluandique :

- PH inférieur à 5,0 ;
- Al^{+++} / CEC supérieur à 20 %.

C ou R : Roche-mère : roche magmatique basique