

5ème version (mars 2013)

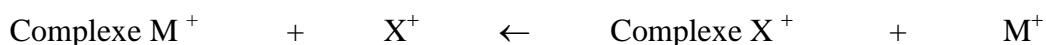
CHAPITRE V :

CHIMIE DU SOL

1ère PARTIE : LE COMPLEXE ADSORBANT DES SOLS

Le sol possède la propriété de retenir diverses substances. En effet, les cations et les anions peuvent être retenus par le **complexe adsorbant du sol**, c'est à dire l'ensemble des colloïdes (substances humiques, argile, sesquioxides,...) dotés de charges négatives ou positives.

Les ions y seront retenus sous **forme échangeable**. En d'autres termes, si on traite un sol par une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, il y aura échange entre les ions du complexe adsorbant et ceux de la solution :



L'absorption ionique dans le sol peut être considérée comme réversible : **les ions échangeables du complexe adsorbant sont en équilibre avec la solution du sol** : toute modification de la composition de la solution du sol provoque un changement de cet équilibre par échange : certains ions du complexe passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions, qui étaient auparavant en solution (adsorption).

Le pouvoir adsorbant est la propriété que possède le complexe adsorbant du sol, de retenir à sa surface des ions provenant de la solution du sol. Cette définition est illustrée dans le schéma ci-dessous (figure 1).

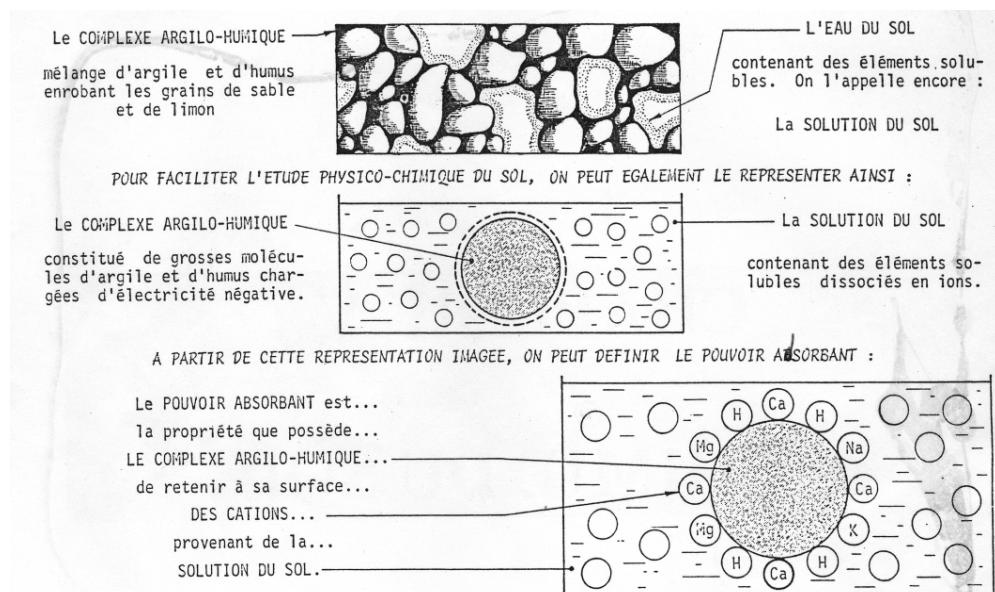


Figure 1 : Le complexe adsorbant du sol (tiré de Soltner D. ,1992)

I. La sorption et l'échange des cations :

1. Généralités :

Les cations sont fixés à la surface des colloïdes sur les plages où se développent des charges négatives.

Les questions relatives à la nature des colloïdes négatifs du sol et de l'origine de leur charge ont déjà été discutées antérieurement dans les chapitres précédents.

Nous n'y reviendrons pas ici.

2 Principaux facteurs réglant l'intensité des phénomènes de sorption et d'échange des cations :

a) la nature des colloïdes :

Le tableau suivant donne la capacité de sorption des principaux colloïdes négatifs à PH 7 :

Kaolinite	3 à 15 meq / 100 g
Halloysite	5 à 50 meq / 100 g
Montmorillonite	80 à 150 meq / 100 g
Illite	10 à 40 meq / 100 g
Chlorite	10 à 40 meq / 100 g
Vermiculite	100 à 150 meq / 100 g
Matière organique	100 à 450 meq / 100 g

Mais, *pour un même colloïde, les valeurs de CEC dépendent du PH* : l'augmentation des valeurs de PH se traduit généralement, pour les colloïdes négatifs, par une augmentation des charges négatives. Inversément, l'acidification du sol se traduit par une diminution de la sorption cationique.

A titre d'exemple, le tableau suivant donne les valeurs CaO sorbé (en meq / 100g d'argile) en fonction du PH :

PH	CaO sorbé en meq pour 100 g d'argile
2.61	0.53
3.81	3.75
4.75	6.75
6.35	8.70
6.90	11.90
7.00	14.95
8.00	16.76
8.60	25.44
10.54	35.12

b) la nature des ions :

La fixation des ions suit un ordre préférentiel : les cations habituellement fixés sur le complexe sont :

1. les ions H^+
2. les cations métalliques, parmi lesquels :
 - certains sont fixés en quantité importante : Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , ...
 - d'autres en quantité généralement plus limitée : ♠ l'ion ammonium NH_4^+
 - ♠ les oligo-éléments : Mn^{++} , Zn^{++} , Cu^{++} , ...
 - ♠ le fer Fe^{++} ou Fe^{+++}
 - ♠ l'aluminium Al^{+++}

L'intensité avec laquelle ces ions sont retenus est en général la suivant :

ANIONS : SO_4^{2-} > F^- > NO_3^- > Cl^- > Br^- > ...

CATIONS : Li < Na < Mg < Ca < Ba < Al < H

Un cation est donc déplaçable par tous ceux qui sont situés à sa droite.

Mais cet ordre de préférence (*cations à égales concentrations dans la solution du sol*) est différent pour chaque type d'argile et pour l'humus.

Par exemple :

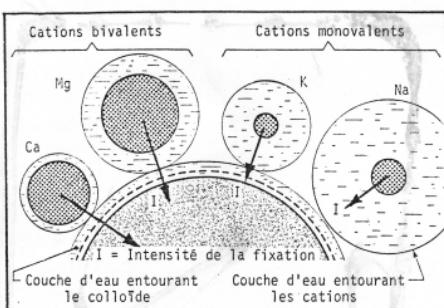
Kaolinite	Na < H < K < Mg < Ca < Ba
Montmorillonite	Na < K < H < Mg < Ca < Ba
Mica	Na < Mg < Ca < K < H < Ba
Acides humiques	Na < K < Mg < Ca < Ba

Cet ordre préférentiel de fixation, d'une grande importance pédologique, peut s'expliquer ainsi :

→ l'intensité de fixation dépend de la valence et de l'hydratation des ions :

Les ions bivalents Ca^{++} et Mg^{++} sont plus énergiquement retenus que les ions monovalents K^+ , Na^+ , ...

Les ions faiblement hydratés (Mg^{++} et surtout Ca^{++}), c'est à dire entourés d'une faible couche d'eau (voir figure 2ci-dessous)) sont mieux fixés que les ions fortement hydratés (K^+ et Na^+)



L'INTENSITÉ DE FIXATION DES CATIONS dépend de leur valence et de leur hydratation.

- Les ions bivalents, Ca et Mg, sont plus énergiquement fixés que les monovalents.
- Plus les cations sont entourés d'une couche d'eau importante, moins ils peuvent s'approcher des colloïdes. Pour cette raison, le sodium, bien qu'étant un ion flocculant, assure la flocculation la moins stable.

Figure 2 : La fixation des cations : valence et degré d'hydratation (tiré de Soltner D., 1992)

→ pour chaque ions, il existe un équilibre entre la quantité de cet ion fixée sur le complexe adsorbant et la concentration de cet ion dans la solution du sol.

3. Le mécanisme de l'échange des cations :

a) Deux exemples d'échange de cations :

- *Le remplacement des ions H⁺ par des cations Ca⁺⁺ :*

Lorsque l'on introduit de la chaux dans un sol, ses molécules se dissocient :



La concentration d'ions Ca⁺⁺ augmente dans la solution du sol et cette concentration se communique au complexe, par exemple un complexe argilo-humique abondamment garni d'ions H⁺ : un cation Ca⁺⁺ prend la place de deux ions H⁺, qui se combinent aux anions OH⁻ apportés par la chaux pour former de l'eau :

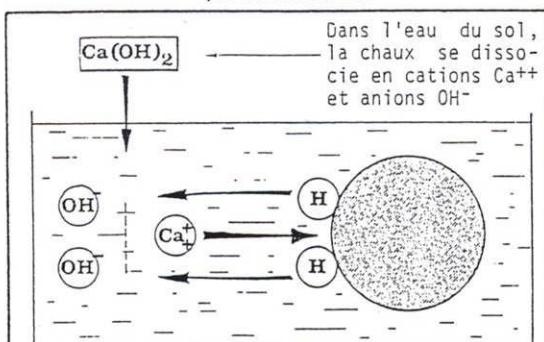


- *L'échange de cations Ca⁺⁺ contre des cations K⁺ :*

Si dans ce sol enrichi en calcium par le chaulage, on introduit du chlorure de potassium (KCl, engrais potassique), ce sel se dissout, puis se dissocie en anions Cl⁻ et cations K⁺. Ces derniers, augmentant la concentration en ions K⁺ de la solution, provoquent un échange avec le complexe : ils prennent sur celui-ci la place d'ions Ca⁺⁺, à raison de 2 K⁺ pour 1 Ca⁺⁺. Ces cations Ca⁺⁺ remis en solution forment, avec les anions Cl⁻ du CaCl₂, sel soluble qui peut être lessivé : cet apport d'engrais potassique a provoqué une décalcification du sol : *c'est l'action décalcifiante des engrais potassiques* (voir figure 3 ci-dessous).

DEUX EXEMPLES D'ÉCHANGE D'IONS ENTRE LE COMPLEXE ET LA SOLUTION DU SOL

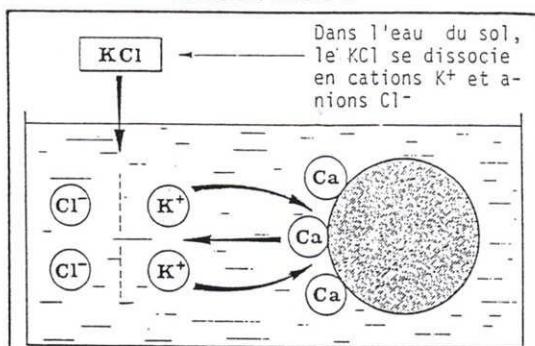
I - Remplacement d'ions H^+
par des cations Ca^{++}



Un cation Ca^{++} prend, sur le complexe, la place de 2 ions H^+ , qui s'associent aux ions OH^- pour former de l'eau.

Cette NEUTRALISATION D'IONS H^+ fait baisser l'acidité du sol : les amendements calcaires permettent donc de lutter contre l'acidité du sol.

II - Echange de cations Ca^{++}
contre des cations K^+



Deux cations K^+ prennent, sur le complexe, la place d'un cation Ca^{++} , qui s'associe aux anions Cl^- pour former $CaCl_2$, sel soluble, donc exposé au lessivage :

Le chlorure de potassium, et tous les engrains potassiques, ont une ACTION DECALCIFIANTE. Il sera nécessaire de recharger régulièrement le sol en Ca.

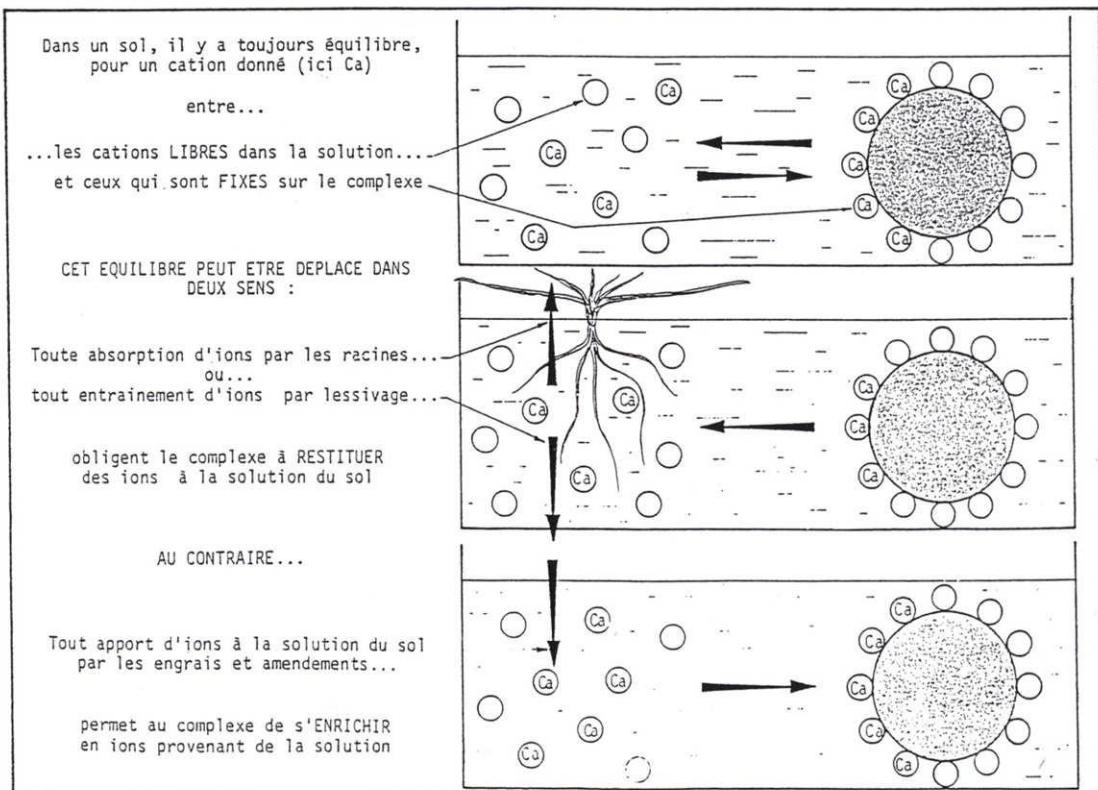
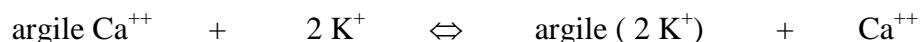


Figure 3 : Deux exemples d'échanges entre le complexe adsorbant et la solution du sol (tiré de Soltner D., 1992)

b) Mécanisme d'échange : recherche d'un équilibre entre complexe et solution du sol :

Supposons la présence simultanée des ions K^+ et Ca^{++} dans le système : argile- solution du sol.

Nous avons l'équation d'équilibre :



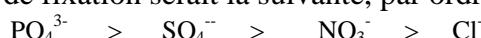
avec :

$$k = \frac{\text{argile } Ca^{++} \times (K^+)}{\text{argile } K^+ \times (Ca^{++})}$$

avec k = constante d'équilibre qui dépend de la nature des colloïdes, de la nature des ions,...

II. La sorption et l'échange des anions :

Dans les eaux de drainage, on trouve beaucoup d'anions NO_3^- , Cl^- , SO_4^{--} ,.... Apparemment donc ces ions ne sont pas retenus par le pouvoir adsorbant du sol. De fait, chacun sait que les nitrates sont très facilement perdus par lessivage. Pourtant, les anions PO_4^{3-} sont très bien retenus. Certains anions peuvent donc être fixés, et leur énergie de fixation serait la suivante, par ordre décroissant :



Plusieurs mécanismes expliquent cette fixation (voir figure 4) :

- la fixation sur les hydroxydes de fer et d'aluminium, colloïdes positifs liés à l'argile, en échange contre des ions OH^- ,
- fixation sur quelques valences positives des argiles, en échange contre des ions OH^- , ou sur des liaisons de bordure (Al^{+++}),
- fixation sur l'argile ou l'humus par l'intermédiaire d'ions Ca^{++} (ponts calciques).

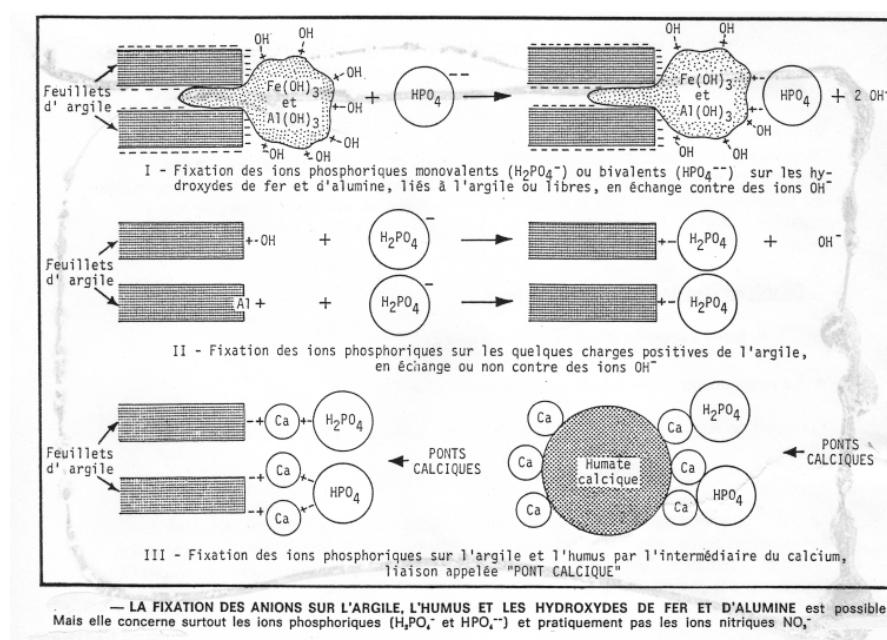


Figure 5 : Les modes de fixation des anions (tiré de Soltner D., 1992)

III. Les valeurs caractéristiques du complexe adsorbant : CEC et V%

1. La capacité d'échange (T ou CEC) :

La capacité totale d'échange ou capacité d'échange de cations est la quantité maximale de cations qu'un sol peut adsorber (pour 100 g de matière sèche).

Autrement dit, cette mesure représente le total des charges négatives du sol disponibles pour la fixation :

- des ions H^+ et Al^{+++} ,
- des cations appelés bases échangeables : Ca^{++} , Na^+ , K^+ , Mg^{++} (l'ion NH_4^+ peut être présent aussi, mais étant très minoritaire, il n'est pas pris en compte).

On l'exprime en milliéquivalents (meq) pour 100 g de matière sèche. L'équivalent d'un corps étant le rapport masse atomique (en g) / valence de ce corps. Le milliéquivalent en est le millième.

Exemple : Un sol qui a une CEC de 20 meq pourrait retenir :

- en Ca^{++} : $20 \text{ meq} * 40/2 = 400 \text{ mg de Ca / 100 g de sol}$,
- en Na^+ : $20 \text{ meq} * 23/1 = 460 \text{ mg de Na / 100 g de sol}$.

La CEC d'un sol dépend de la nature des colloïdes de ce sol et du PH de ce sol (voir I.2.a).

2. La somme des bases échangeables (S) :

Il s'agit de la **somme des quantités de cations basiques échangeables**, fixés sur le complexe à un moment donné. On l'exprime également en meq pour 100 g de matière sèche. **La différence T-S représente donc la quantité d'ions H^+ et Al^{+++} fixés**. Cette différence peut encore être appelée *insaturation*.

$$T = S + Al^{+++} + H^+$$

3. Le taux de saturation (V% ou S/T) :

Le taux de saturation est le rapport somme des bases échangeables / CEC, exprimé en %.

Ce taux est variable d'un sol à l'autre, et, pour un même sol d'une année à l'autre. En effet toute cause capable d'apporter ou au contraire d'enlever des bases échangeables au complexe le fait varier.

Ce taux dépend :

- de la richesse chimique de la roche mère,
- de la fréquence et de l'importance des apports de cations (surtout Ca lors des amendements calcaires,...),
- de l'importance du lessivage, donc du climat, et de la perméabilité du sol.

Les sols calcaires ont souvent un taux de saturation supérieur à 80 %.

Les sols sableux peuvent être pauvres en bases et avoir un taux de saturation inférieur à 20 %.

Le taux de saturation du complexe absorbant est un *précieux indicateur pédologique et agronomique quant à la richesse chimique du sol*. Toutefois , il faut se garder d'établir une équivalence automatique entre taux de saturation et niveau trophique : cette attitude semble critiquable car le niveau trophique (ou plus largement la fertilité) d'un sol dépend de beaucoup d'autres facteurs tels que la teneur en argile, la structure, l'aération, le PH, la profondeur prospectable par les racines, la réserve utile en eau, les teneurs en N P K ,...

Selon la valeur du taux de saturation, on peut ajouter un adjectif au nom du sol :

Taux de saturation S/ T	Adjectif
100 %	saturé
95 %	quasi-saturé
80 %	méso-saturé
50 %	oligo-saturé
30 %	désaturé
15 %	hyper-désaturé
0 %	

IV. Conclusion :

Le complexe adsorbant, par son pouvoir adsorbant,

- met en réserve les éléments nutritifs qui, sans lui, seraient perdus par lessivage, en les échangeant principalement contre les ions Ca^{++} , faciles à déplacer,
- libère ces éléments pour les racines, en les échangeant notamment contre les ions H^+ formés continuellement par l'activité biologique (microbes et racines) élaborant de l'acide carbonique (H_2CO_3),
- régularise la composition de la solution du sol, milieu de vie des racines et des microbes.

Ce mécanisme de régulation concerne, outre la teneur en bases échangeables, mais aussi la teneur en Al^{+++} et en H^+ , ions responsables de l'acidité des sols (voir deuxième partie).

2ème PARTIE : L'ACIDITE DES SOLS

I. Sources des ions H⁺ dans le sol :

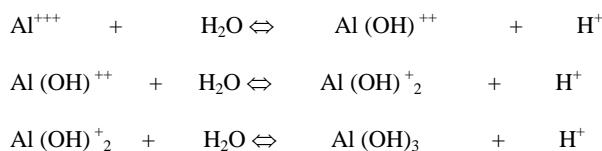
L'acidité du sol est définie par la concentration en ions H⁺.
D'une manière très générale, on peut affirmer que la grande majorité des hydrogènes du sol, proviennent des activités biologiques.

Mais considérés en un moment donné, sur un sol déterminé, **les ions H⁺ se répartissent en deux catégories :**

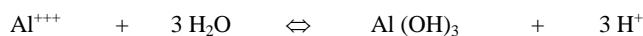
- a) les ions H⁺ présents dans la solution du sol ;
- b) les ions H⁺ fixés sur les colloïdes à l'état échangeable ;

Les sources de production d'ions H⁺ sont :

- a) les atomes d'hydrogènes appartenant à des acides organiques et pouvant être libérés ;
- b) ions H⁺ issus de la réaction entre CO₂ produit par la faune du sol, la respiration des racine, la décomposition des matières organiques,... : CO₂+H₂O \rightleftharpoons HCO₃⁻ +H⁺
- c) les ions H⁺ résultant de la fixation de molécules d'eau sur certains ions comme Al⁺⁺⁺ (voir 3ème partie concernant l'aluminium) :



Soit l'équation globale :



II. Les différentes expression de l'acidité :

Parmi les expressions les plus courantes de l'acidité (voir figure ci-dessous), citons :

a) L'acidité actuelle (=acidité active) :

Cette valeur est un reflet approximatif de la quantité d'ions H⁺ libres se trouvant dans la solution du sol. Elle s'exprime le plus souvent par le PH du liquide obtenu en délayant un poids donné de terre dans un certain volume d'eau distillée (Rapport SOL / SOLUTION : 1/ 2,5).

Ce PH vise à donner une idée de la concentration en ions H⁺ les plus actifs.

Il s'agit du PH que l'on peut lire avec le liquide indicateur de terrain

b) L'acidité potentielle :

Cette valeur exprime la somme des ions H^+ fixés sur le complexe adsorbant (beaucoup plus abondants que les H^+ libres dans la solution du sol), qui constituent une « réserve » actuellement non disponible.

L'acidité totale du sol est composée de l'acidité potentielle et de l'acidité actuelle.

c) L'acidité d'échange :

Elle tend à mesurer la masse des ions H^+ échangeables, susceptibles de jouer un rôle écologiquement important à brève échéance. **Il s'agit d'une mesure indirecte de l'acidité potentielle du sol.**

Elle s'obtient en additionnant le sol d'une grande quantité d'un sel neutre comme le KCl dont les K^+ vont provoquer le passage dans la solution du sol, d'un grand nombre d'ions H^+ (et Al^{+++}) qui étaient fixés d'une manière échangeable à la surface des colloïdes.

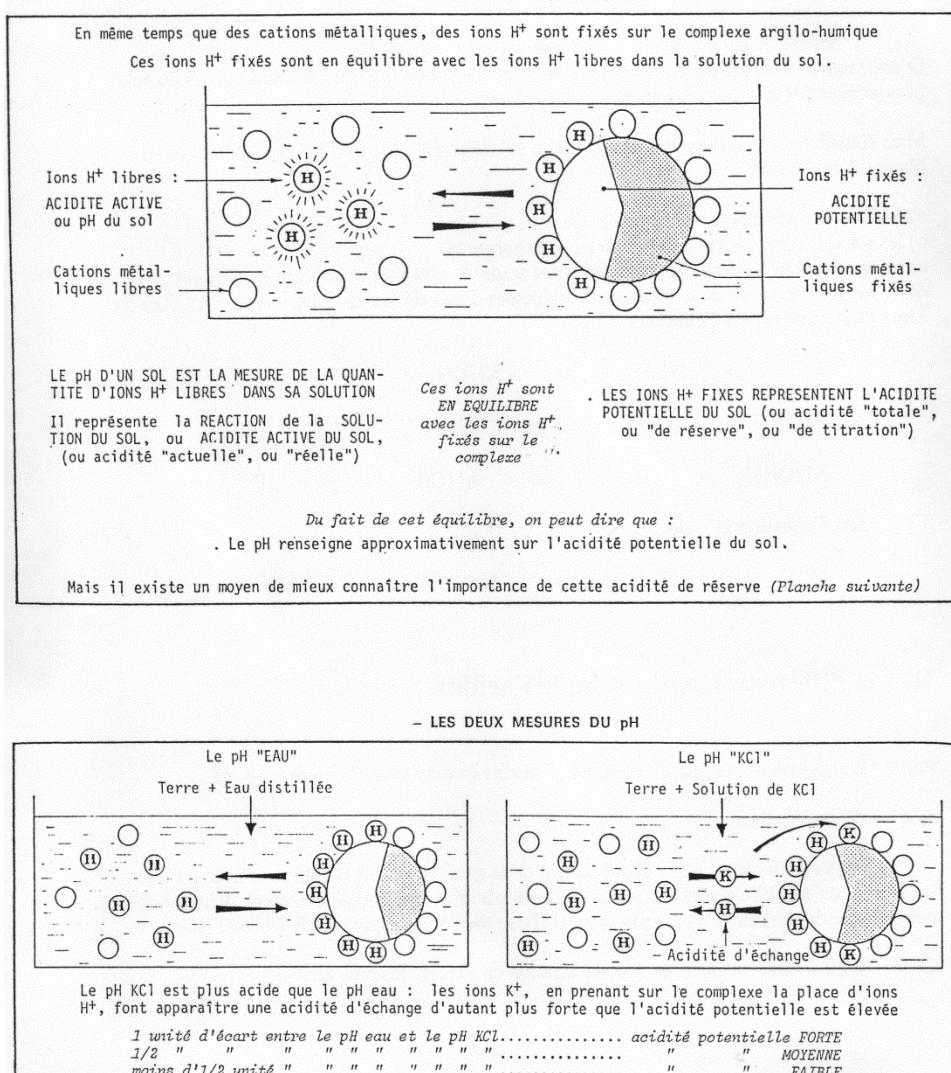


Figure 6 : Les différents types d'acidité du sol (tiré de Soltner D., 1992)

III. Relation entre le PH et le taux de saturation :

L'acidité potentielle, somme des ions H^+ (et Al^{+++}) fixés, représente l'« insaturation » du complexe, c'est à dire la différence $T - S$.

Comme les ions H^+ libres , qui représentent l'acidité actuelle, sont en équilibre avec les ions H^+ fixés, qui représentent l'acidité potentielle, on peut penser que le PH (eau) donne une idée sur l'acidité potentielle et donc, par différence, sur le taux de saturation.

S'il en est ainsi,

- un PH bas (acidité élevée) correspond à un taux de saturation faible ;
- un PH élevé (acidité faible) correspond à un taux de saturation important.

En réalité cette relation n'existe que dans les cas extrêmes :

- le taux de saturation très faible (inférieur à 10 %) de certains sols de landes, correspond à un PH égal ou inférieur à 4 ;
- les sols calcaires, au taux de saturation supérieur à 80 %, ont un PH supérieur à 7, souvent de 8 à 8,5.

Mais pour les acidités moyennes, il n'existe aucune corrélation précise entre le PH et le taux de saturation :

- un sol peut avoir, à PH 7, un taux de saturation de 60 à 90 %,
- entre PH 4,5 et 5,5, le taux de saturation peut varier de 30 à 70 %.

Comment expliquer ce manque de corrélation ? :

Plusieurs causes font varier le PH pour un même taux de saturation :

- **la nature des colloïdes** : les ions H^+ fixés sur l'humus ou sur la montmorillonite se dissocient plus facilement que ceux que fixe la kaolinite et surtout les hydroxydes de fer et d'alumine.

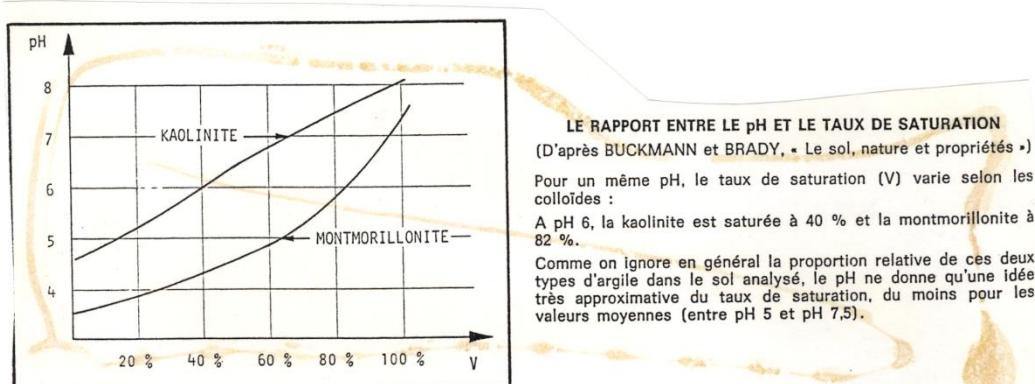


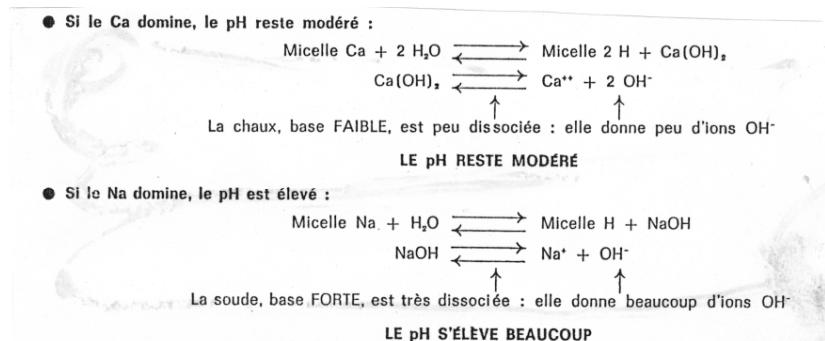
Figure 7 : Corrélation entre PH et S/T (tiré de Soltner D. ,1992)

- **la présence d'ions Al^{+++} et Fe^{+++}** : dans les sols acides, des ions Al^{+++} et Fe^{+++} qui faisaient partie des feuillets d'argile, deviennent échangeables : ils se fixent en abondance sur le complexe et passent en solution : au contact de l'eau, ils forment des hydroxydes de fer et d'alumine avec production d'ions H^+ qui élèvent l'acidité actuelle (donc abaissent le PH) sans pour autant que l'acidité potentielle soit forte :



- **la nature des cations adsorbés :**

Pour un même taux de saturation, un sol aura un PH d'autant plus élevé qu'il présentera un rapport (Na + Mg) / Ca plus élevé. En effet :



IV Le pouvoir tampon des sols :et les variations de PH des sols :

A. Les variations de PH des sols :

Le PH des sols (horizon A) s'échelonne entre des limites relativement restreintes :

- Celui des podzosols, sols à humus de type moder ou mor et au complexe très désaturé, peut descendre jusqu'à 3,5 .
- Celui des rendosols, sols très calcaires, s'élève souvent jusqu'à 8-8,5.
- Celui des sols riches en sodium peut dépasser 9-9,5.

Le PH d'un sol varie, à court terme, avec la saison :

Ces variations sont en général d'une demi-unité, parfois davantage et sous climat tempéré, le PH est minimum en été et maximum en hiver.

Ces variations s'expliquent par :

- la dilution de la solution du sol qui a tendance, en hiver, à diminuer la concentration en H^+ , et donc à relever le PH.

- la production d'acides par activité biologiques (microbes et racines), maximale en été : production d'acides organiques et de CO_2 lors de la respiration ou de l'humification,...

Le PH d'un sol varie à long terme :

Sous climat tempéré humide, tout sol a tendance

- à se désaturer, c'est à dire à perdre progressivement ses cations basiques, notamment le Ca^{++} : il se décalcifie;
- à s'acidifier, c'est à dire à se charger de quantités croissantes d'ions H^+ . Du fait de l'équilibre acidité active ou actuelle- acidité potentielle, cette acidification porte à la fois sur le complexe et sur la solution.

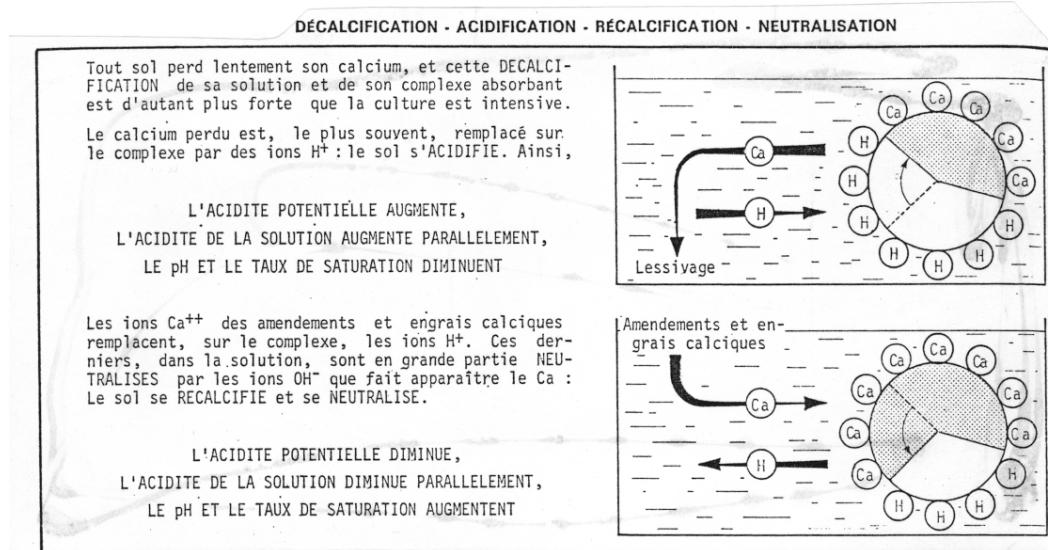


Figure 8 : Les variations de PH d'un sol agricole (tiré de Soltner D., 1992)

B. Le pouvoir tampon : aptitude des sols à s'opposer aux variations de PH :

Lorsque l'on ajoute à de l'eau pure des quantités croissantes d'un acide ou d'une base, on constate que le PH varie brusquement, passant par exemple, pour une seule goutte d'acide, de PH 7 à PH 3, ou pour une seule goutte de base, de PH 7 à PH 11.

La même expérience réalisée avec un échantillon de terre montre que les variations sont beaucoup plus progressives, et d'autant plus qu'il est argileux et humifère (voir figure 9 ci-dessous). On dit que le sol a un pouvoir tampon, qui le rend apte à résister aux variations de PH. Ce pouvoir est lié à la présence des colloïdes.

Il peut s'expliquer comme suit :

- Si la quantité d'ions H^+ augmente dans la solution, une partie de ces ions se fixe sur le complexe, en échange par exemple de Ca^{++} . L'acidité active et l'acidité potentielle ont d'autant moins varié que le complexe est important, donc que le sol est plus argileux ou humifère.
- Si les ions H^+ en solution diminuent, neutralisés par les ions OH^- apportés par exemple par la chaux, ils sont remplacés par des ions H^+ du complexe dont la place est prise par les Ca^{++} de la chaux : l'acidité active, comme l'acidité potentielle, ont baissé, mais d'autant moins que le sol est plus argileux ou humifère.

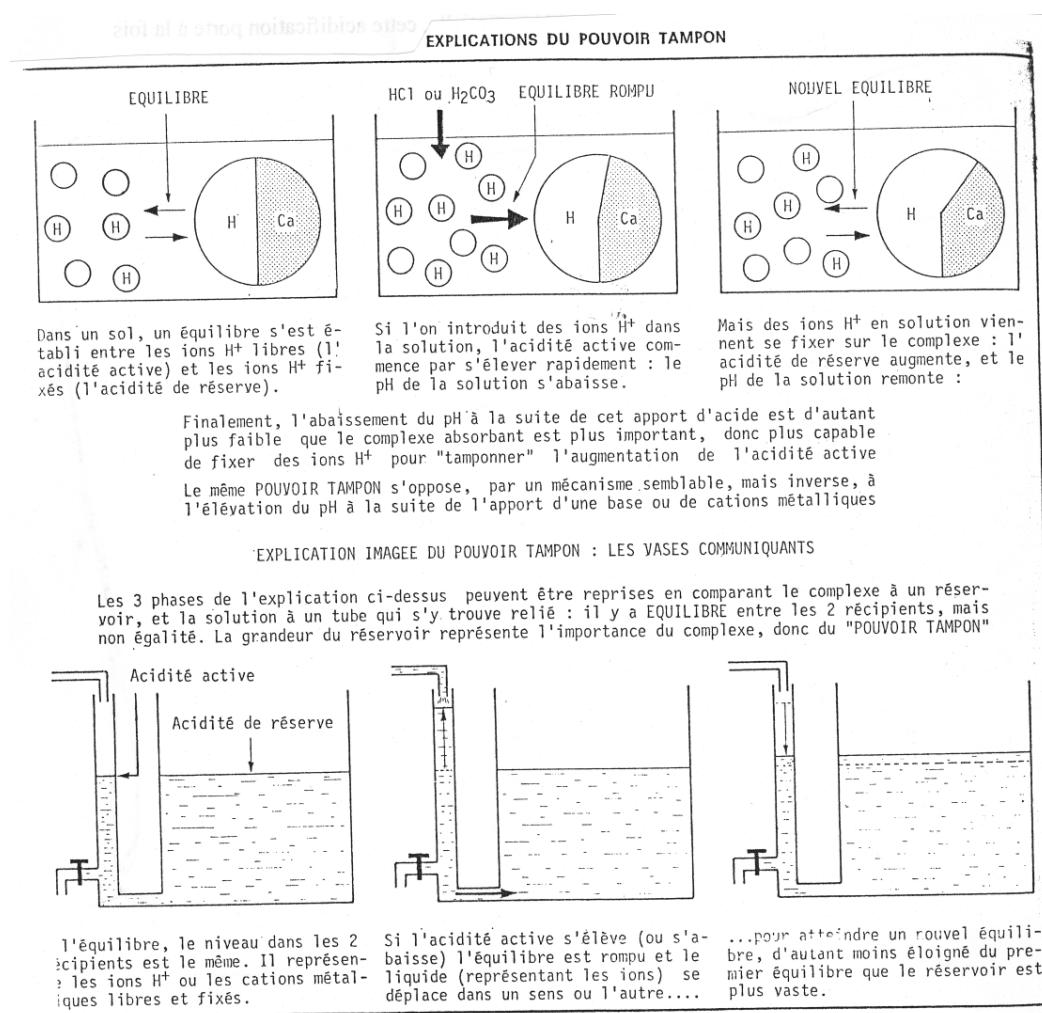


Figure 9 : Le pouvoir tampon (tiré de Soltner D., 1992)

3ème PARTIE : NUTRITION

I. Généralités :

1. La nutrition minérale des plantes :

Une des fonctions essentielles du sol, outre son rôle de support, consiste à fournir à la plante les éléments nutritifs (nutriments) qui lui sont nécessaires.

Selon la théorie encore la plus généralement admise, les prélevements minéraux par les racines des végétaux se feraient au départ des solutions du sol.
Toutefois, il semble qu'il faille accepter la possibilité de certains échanges par contacts directs entre les colloïdes du sol et les cellules des poils absorbants radiculaires.

2. Les sources d'éléments nutritifs :

Les ions nutritifs, présents en un moment donné dans les solutions du sol, peuvent avoir une quadruple origine :

- la réserve minéralogique et les sels solubles,
- le stock ionique fixé par le complexe adsorbant,
- la quantité immobilisée en un moment donné sous forme organique,
- les ions de la solution du sol.

a. La réserve minéralogique :

Cette réserve est mise à contribution chaque fois qu'un ion donné en solution provient directement d'un minéral de la roche-mère géologique, comme un feldspath, un mica, un carbonate, un phosphate,...

Il est d'ailleurs bien connu que l'élimination progressive des ions libérés par suite du prélevement végétal peut apparaître un facteur important de l'altération des constituants minéralogiques du sol, à cause des réactions chimiques qui s'orientent systématiquement dans un sens déterminé.



MK^+ étant par exemple de l'orthose, du mica,...
 H^+ étant libéré par les racines de la plante.

Ce type de réserve nutritive est surtout utile quand il n'y a pas de restitution minérale sous forme d'engrais, comme en forêt.

Parmi les sels solubilisables d'origine principalement secondaire, et n'appartenant pas à la réserve minéralogique proprement dite, citons :
les différents sels de calcium ou de magnésium : carbonates, sulfates, phosphates,...

b. Le stock ionique fixé par le complexe adsorbant du sol :

Il s'agit en général de la partie la plus importante de la réserve ionique utilisable à brève échéance.

c. La quantité fixée sous forme organique :

Certains éléments comme l'azote, le phosphore et le soufre sont immobilisables en quantités plus ou moins importantes à l'état de composés organiques principalement protéiques qui interviennent dans la composition de l'humus.

La fixation organique peut s'évaluer comme suit :

- Azote : 50 à 95 % de l'azote total est sous forme organique dans le sol.
- Phosphore : 25 à 50 % du phosphore total, parfois jusque 70 % dans les sols agricoles.
- Soufre : environ 80 % du soufre total.

d. Les ions de la solution du sol

3. La dynamique des éléments chimiques, les états d'équilibre ionique :

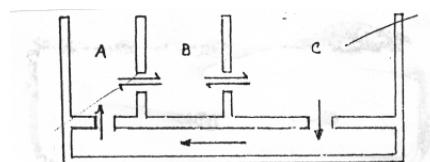
Une notion fondamentale sur laquelle il faut insister, est le caractère dynamique des éléments chimiques dans le sol et les changements dans les états d'équilibre ionique.

Le passage réversible d'un élément à l'état stable, fixé, à un état plus mobile, échangeable, donc accessible pour la plante, peut s'observer en examinant les différentes formes selon lesquelles cet élément considéré se trouve présent dans la phase solide du milieu édaphique.

Les catégories (formes) sont :

- A : facilement utilisable ,
- B : moyennement utilisable ,
- C : difficilement utilisable, ou inerte.

Les trois catégories sont liées entre-elles suivant le schéma ci-dessous.



II. Les principaux éléments nutritifs :

On distingue les nutriments de base, absorbés souvent en quantité élevée par la plante : azote, phosphore, soufre, calcium, magnésium, potassium, et les oligo-éléments indispensables à faible dose : fer, manganèse, cuivre,...

Enfin, il convient d'opposer aux éléments favorables, et même indispensables à la vie de la plante, ceux qui ont une action négative, voire toxique : l'aluminium en sols acides et certains polluants : plomb, mercure, cadmium.

1. CATIONS BASIQUES : K⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ :

L'importance de ces cations a déjà été soulignée dans la première partie de ce chapitre à propos de l'étude du complexe adsorbant et des phénomènes d'échanges cationiques. Ils n'interviennent pas seulement en tant qu'éléments nutritifs, mais ils jouent aussi un rôle essentiel dans la neutralisation de l'acidité, le maintien de l'activité biologique générale, et de la structure du sol.

Ces cations sont absorbés par les plantes sous la forme de sels solubles (bicarbonates, nitrates, sulfates) dans la solution du sol. Mais, en milieu très sec, les racines de la plupart des plantes peuvent absorber directement, sans passer par la solution, certains cations basiques échangeables, par échange avec des ions H⁺ émis par la racine.

A. Les réserves minérales :

a. Le potassium :

La forme A comprend les ions K⁺ de la solution du sol et ceux fixés à l'état facilement échangeable sur le complexe sorbant du sol.

La forme B correspond, par exemple, aux éléments fermement retenus à la surface interne des argiles, mais à proximité des bords.

La forme C n'est autre que la réserve potassique des minéraux silicatés tels que les feldspaths (orthose, microcline,...) et les micas.

b. Le calcium et le magnésium :

La plus grande partie de ces éléments existe sous la **forme A**, soit à l'état d'ions facilement échangeables, soit sous la forme de sels solubles ou aisément altérables comme les sulfates, carbonates,...

La **forme B** ne devient importante qu'en milieu fortement alcalin quand il y a précipitation des sels calciques ou magnésiens sous forme de phosphates ou de carbonates par exemple. D'autre part, en sols très acides, les ions Ca^{++} sont fortement retenus par le complexe (rappelons que le complexe retient d'autant plus fortement le Ca^{++} que celui-ci est en faible quantité) et sont plus difficilement échangés.

La **forme C** comprend différents minéraux :

Dans les roches cristallines, le calcium se trouve dans le réseau cristallin des feldspaths, associé au sodium et au potassium, alors que le magnésium est associé au fer dans les matériaux ferromagnésiens : micas, amphiboles, pyroxènes, péridotites.

Dans les roches carbonatées, le Mg peut rejoindre le calcium dans les calcaires dolomitiques ou la dolomie.

En région cristalline (granites,...), les teneurs en calcium et en magnésium échangeables sont toujours faibles (inférieures à 1 meq pour 100 g), par suite du faible débit de l'altération sous climat tempéré et de l'entraînement par les eaux de pluie. Il en résulte souvent une acidité assez prononcée des sols par déficit de saturation du complexe adsorbant pour ces deux éléments majeurs.

B. Le problème du calcaire « actif » :

a. Calcaire total (ou carbonates totaux) et calcaire « actif » : définitions :

- Calcaire total :

C'est la quantité de carbonates déterminée par « calcimétrie volumétrique » c'est à dire par mesure du volume de CO_2 dégagé, suite à l'action d'un excès d'HCl sur un poids connu d'échantillon de terre.



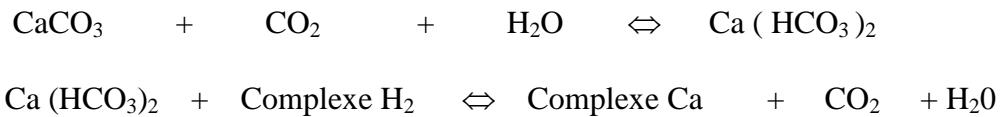
Cette méthode ne permet pas le dosage de MgCO_3 car, en présence de dolomie, l'attaque à froid de HCl est très lente et incomplète.

- Calcaire « actif » :

Du taux de calcaire total présent dans la terre fine, on ne peut tirer d'enseignements agronomiques. Car on ignore si ces carbonates sont de la taille de sables ou sous la forme de particules très fines. Or, pour les plantes, c'est la réactivité du calcaire qui est importante (réactivité élevée pour les fines particules).

C'est pourquoi Drouineau, en 1942, a tenté de mettre au point un test d'aptitude des carbonates à une dissolution rapide. Actuellement, le dosage du calcaire dit actif consiste à déterminer quelle quantité de Ca^{++} réagit avec l'oxalate d'ammonium.

Le calcaire actif est le carbonate de calcium à l'état pulvérulent : ses particules, de la taille du limon ou de l'argile, sont facilement attaqués par le CO₂ (acide carbonique) ou les H⁺ des acides organiques du sol, qui les transforment en bicarbonates solubles, qui sature progressivement le complexe adsorbant du sol :



b. Inconvénients de la présence de calcaire actif :

La présence du calcaire actif a été mise au point par Drouineau afin de mieux cerner les risques de « chlorose ferrique ». Cette maladie sévit en effet dans les sols très calcaires où elle frappe la vigne, certains arbres fruitiers (pêchers , cerisiers) ou forestiers (douglas, pins sylvestres ou maritimes, mélèzes du Japon , châtaignier, chêne rouge d'Amérique, épicéa commun) et certaines plantes herbacées (haricot, lupin). Sur sols calcaires, le feuillage de ces espèces prend une teinte vert-jaune.

Des recherches ont montré que la chlorose ferrique était une maladie physiologique dont l'origine était un **défaut d'absorption ou d'utilisation du fer** par la plante (insolubilisation du fer due à la présence de calcaire actif). A ce titre, il est probable que la raison essentielle de l'inadaptation de certaines essences au calcaire réside dans une perturbation du métabolisme du fer, sous l'influence en particulier des ions HCO₃⁻ qui gênent les échanges d'électrons. Des acides organiques, élaborés par la plante à la suite de l'excès d'absorption de calcium, empêcheraient également une bonne fixation du fer par la plante. La réduction du fer ferrique en fer ferreux, seul actif dans le métabolisme, se trouverait aussi entravée.

Le calcaire actif cause également d'autres inconvénients (insolubilisation des phosphates, mauvaise absorption du Mn, antagonisme Ca/ K,...) : nous y reviendrons plus loin.

C. Nutrition minérale : rôles des équilibres ioniques

a. Calcium : il est généralement présent en quantité suffisante pour assurer les besoins des plantes cultivées. L'apport d'amendements calciques a surtout pour but de compenser les pertes par drainage, et d'améliorer l'activité biologique générale et les conditions de nutrition en élevant le PH. Il convient de signaler à ce sujet qu'un surchaillage est toujours nuisible car il conduit à une insolubilisation du phosphore et de certains oligoéléments : le PH ne doit jamais dépasser 7.

Le calcium est également un élément important pour la structure du sol et sa stabilité.

Au point de vue du fonctionnement physiologique des plantes, le calcium joue un rôle d'antagoniste vis à vis du potassium. En effet, contrairement au K, le Ca ralentit l'absorption de l'eau et accroît la transpiration. Il a également une fonction de régulateur de croissance en

freinant l’élongation des organes. Enfin, il intervient dans le développement radiculaire des plantes.

b. Magnésium et potassium : ce sont les deux cations qui posent le plus de problèmes aux agriculteurs : ils sont en effet l’un et l’autre indispensables à la vie de la plante : Mg en tant qu’élément constitutif de la chlorophylle et activateur de certains enzymes (intervenant dans le métabolisme du phosphore, des protéines, des glucides, des lipides et des vitamines), K comme agent catalytique de la synthèse des glucides et des protides... Les carences en Mg et K sont rares sur les sols argileux ou limono-argileux, fréquentes par contre, sur les sols sableux ou très calcaires.

D’un point de vue nutritionnel, l’excès d’un des trois cations Ca, Mg ou K, provoque un phénomène d’antagonisme à l’égard des deux autres. C’est à dire par exemple qu’un excès d’apport en K par engrais peut être nuisible car il freine l’absorption de Mg par les plantes. Dans ces conditions, il peut être utile dans le cas de sols très calcaires, d’apporter des engrais riches en K et Mg. . Un inconvénient toutefois : le K est rapidement lessivé en cas d’apport par engrais.

D. La notion de plantes calcicoles et calcifuges¹ :

Le calcaire actif libère du calcium soluble dans les solutions du sol en quantité d’autant plus élevée que le CO₂ est abondant (cas des sols à forte activité biologique). Ceci provoque non seulement la saturation du complexe en Ca⁺⁺ au détriment des autres cations (Mg⁺⁺, K⁺), qui peuvent alors faire défaut, mais aussi l’insolubilisation de certains oligoéléments (Fe notamment) indispensables et des carences en P et N. Les espèces calcicoles réagissent à cet excès de calcium par l’émission de substances qui mobilisent le Fe, alors que les espèces calcifuges, qui n’ont pas cette propriété, souffrent de chlorose par suite d’une carence en cet élément.

¹Il serait préférable d’employer le terme de **calcarifuges**, terme encore peu utilisé, mais plus conforme à la réalité puisque calcifuge signifierait, en toute rigueur, « qui fuit le calcium » y compris donc le calcium échangeable, alors que c’est la présence de carbonates que fuient les espèces « calcifuges ».

2. L'AZOTE :

L'azote est un composé fondamental de la matière vivante. Il est nécessaire à l'élaboration des composés organiques végétaux : acides aminés, acides nucléiques, protéines, chlorophylle. Il entre dans la composition des enzymes qui dirigent le métabolisme des arbres. Lorsque les autres facteurs de croissance sont près de leur optimum, il détermine l'importance de la production végétale. Les jeunes plants sont plus riches en azote, à l'unité de poids, que les plus âgés ayant poussé dans les mêmes conditions. De même, la teneur en azote varie beaucoup d'un tissu à l'autre ; elle atteint le maximum dans les feuilles. En cas de carence, les aiguilles et les feuilles sont petites et d'une couleur vert-jaunâtre (chlorose). Ces carences ont souvent lieu dans les stations à mor ou dysmoder.

La réserve d'azote du sol est en très grande partie sous forme organique inassimilable (sauf l'ion NH_4^+ fixé minoritaire), soit au sein de la matière organique fraîche, soit sous la forme de composés humiques.

Or, la forme directement assimilable par les plantes est minérale : soit cationique, NH_4^+ , se trouvant sous la forme échangeable ; soit anionique, NO_3^- , sous la forme soluble (l'ion NO_3^- n'est pratiquement pas retenu par le complexe anionique du sol).

Pour être assimilé, il est donc nécessaire que l'azote organique soit minéralisé. La nutrition azotée des arbres sera donc en étroite relation avec la vitesse de minéralisation de l'azote contenu dans la matière organique.

A. Le cycle de l'azote:

Le sol peut s'enrichir en azote de plusieurs façons :

- l'azote nitrique produit lors des orages et retombant au sol avec les eaux de pluie est estimé, dans nos régions à environ 5 kg/Ha/an ;
- certaines bactéries libres comme les azotobacters ou les clostridiums ainsi que certaines bactéries symbiotiques comme les Rhizobiums chez les légumineuses (robinier), fixent dans le sol une certaine quantité d'azote atmosphérique (N_2). Certains auteurs citent le chiffre moyen de 20 à 25 kg N/ Ha/an fixé de cette manière (la fixation symbiotique avec les légumineuses comme la luzerne peut s'élever à 300 kg de N/Ha/an dans les meilleures conditions) . En forêt, d'autres micro-organismes participent à la fixation symbiotique de l'azote, par exemple les actinomycètes du genre *Frankia* qui s'associent à l'aulne.
- la fixation de l'azote atmosphérique par des bactéries libres dans le sol : c'est le cas des bactéries aérobies du genre Azotobacter.
- la décomposition des matières organiques libère l'azote stocké sous forme organique (protéines ,...).

La plante utilise l'azote sous la forme de NO_3^- et/ou de NH_4^+ et l'incorpore dans ses tissus.

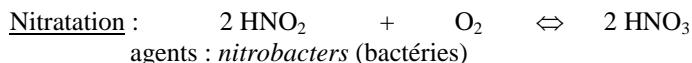
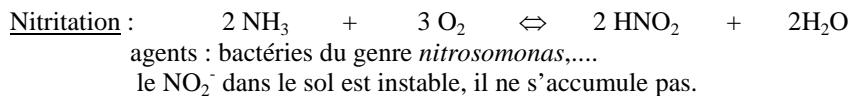
Deux processus importants expliquent la formation de NH_4^+ et de NO_3^- dans le sol, à partir de la décomposition des matières organiques : l'ammonification et la nitrification.

a. L'ammonification : C'est la libération de NH_3 à partir de la dégradation progressive des protéines. Les agents sont essentiellement des bactéries (*pseudomonas*) et des champignons.

L'ammoniac formé peut alors évoluer de trois façons :

- il peut être fixé sous forme de NH_4^+ sur le complexe adsorbant du sol ;
- il peut être transformé en nitrate (nitrification) ;
- il peut se volatiliser dans l'atmosphère

b. La nitrification: C'est une réaction d'oxydation de l'ammoniac qui peut se faire en deux étapes :



Ces deux réactions sont presque simultanées. **Les principales conditions d'une bonne nitrification sont les suivantes :**

- une teneur en eau s'approchant de la capacité au champ ,
- une bonne aération du sol ,
- un PH proche de la neutralité.

Le taux de nitrification est le rapport entre la quantité d'azote produite sous forme nitrique et la quantité d'azote produite sous forme nitrique ou ammoniacale.

Ce taux est élevé dans les eumulls (forme nitrique prépondérante) et bas dans les moders (nutrition sous forme ammoniacale prépondérante).

Bien que le lessivage des nitrates soit facilité par leur grande solubilité, ce sont les horizons organiques superficiels qui en sont les plus riches.

Les nitrates formés peuvent évoluer comme suit :

- utilisation par les végétaux,
- entraînement par les eaux de ruissellement ou d'infiltration ,
- utilisation par les microorganismes du sol ,
- dénitrification : certains organismes comme les bactéries du genre **Denitrificans** peuvent transformer le NO_3^- en NH_3 . On a calculé que la perte d'azote par dénitrification est de l'ordre de 70 kg de N /ha / an.

B. Nutrition azotée des espèces forestières :

La potentialité d'un sol à fournir au peuplement qu'il porte une bonne nutrition azotée, est déterminante pour le niveau de production de ce dernier.

En forêt, la nutrition azotée dépend étroitement du type d'humus : la production annuelle d'azote minéral, très élevée sur les eumulls (150 kg N / ha / an), est encore optimum dans le mull mésotrophe à PH 5,5 (qui fournit 80 à 120 kg N/Ha/an), tandis qu'elle sera réduite de moitié environ pour un moder, et s'abaisse à quelques kg par ha et par an pour un mor de bruyères à C/N élevé.

En d'autres termes, la libération d'azote suite à la minéralisation de la matière organique est :

- très bonne dans les eumulls ;
- bonne dans les mésomulls ;
- assez bonne à moyenne dans les oligomulls jusqu'aux eumoders ;
- très moyenne à médiocre dans les dysmoders
- mauvaise dans les mors.

La nitrification (formation de nitrates à partir de l'ammoniac) intervient très rapidement dans les mulls carbonatés ou eutrophes ; elle reste active quoique plus lente dans les mull mésotrophes et même acides. En revanche, elle est lente et progressive dans les dysmoders et surtout dans les mors.

Les mulls doux sont donc très favorables à la libération d'azote sous forme nitrique, tandis que les humus plus acides libèrent une plus forte proportion d'azote ammoniacal.

Dans les mulls, la production de nitrates a essentiellement lieu dans l'horizon A, tandis que l'ammonification est surtout localisée dans les couches OF des moders.

La forme de nutrition en azote doit être mis en parallèle avec les exigences des espèces arborées forestières² :

- les **neutrophiles** (orme, peuplier, frêne, érable champêtre) exigent une nutrition azotée sous la **forme nitrique** : elles sont capables de réduire les nitrates en vue de leurs synthèses protéiques.
- les **acidiphiles** (pin sylvestre, épicea commun) au contraire sont mal pourvus en enzymes réducteurs et ne peuvent prospérer sur les milieux riches en nitrates : elles souffrent de chlorose nitrique dans de tels milieux. En revanche, elles sont bien adaptées aux mulls acides et aux moder qui leur fournissent une nutrition azotée mixte.
- les **indifférentes** : les feuillus sociaux (chênes pédonculés et sessiles, hêtre) manifestent une certaine plasticité à cet égard, car ils peuvent prospérer sur des types d'humus variés, allant des mull carbonatés aux dysmoders. Toutefois, l'optimum de nutrition de ces espèces exigerait la présence dans le sol d'azote nitrique : sur les moders d'Ardennes, une corrélation positive a été mise en évidence entre l'aptitude des humus à produire des nitrates et l'accroissement du hêtre.

²La même démarche peut être effectuée avec les espèces herbacées et arbustives forestières, c'est ainsi que l'on peut distinguer :

- les nitratophiles (*Urtica dioica*, *Galium aparine*, *Sambucus nigra*,...) : se localisent sur les mulls les plus actifs ;
- les espèces de mull (*Poa chaixii*, *Carex sylvatica*, *Festuca sylvatica*,...) peuvent s'alimenter à partir de l'azote ammoniacal ou nitrique ;
- les acidophiles et les caractéristiques du mor sont peu exigeantes en azote et se contentent de la forme ammoniacale (*Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus*, *Luzula albida*, *Molinia coerulea*).

La présence de calcaire actif dans le sol se traduit par une alimentation azotée en majorité ou en totalité nitrique, de sorte que les espèces qui ne possèdent qu'une faible capacité racinaire de réduction des nitrates subissent un trouble du métabolisme azoté. Ceci est particulièrement net chez l'épicéa commun : en milieu calcaire, cette essence est fortement carencée en azote (on remarque la même chose pour le phosphore et le soufre).

3. LE PHOSPHORE :

Le phosphore est un élément important pour les plantes. Il intervient par exemple dans la formation d'ATP et ADP, composés intervenant dans le transport d'énergie nécessaire au déroulement de diverses réactions biochimiques (métabolisme des glucides, synthèse des enzymes,...). Il a une action sur l'abondance de la floraison et de la fructification (toutes les graines sont riches en phosphore, présent surtout sous forme de phytine).

Les symptômes de carences varient selon les essences. Pour un certain nombre d'essences, comme les épicéas et les mélèzes, les aiguilles des sujets carencés prennent une couleur grise ou vert-bleuâtre. Chez le pin sylvestre, quelques fois aussi chez l'épicéa commun, la coloration tend vers le violet, le brun-violet ou même le rouge. Ce changement de couleur apparaît surtout aux extrémités des aiguilles vers la fin de l'été. Les vieilles aiguilles sont généralement touchées avant les jeunes et plus fortement. Elles finissent par se nécroser, mais ne tombent pas et forment contraste avec les aiguilles jeunes restées vertes. Chez les feuillus (jeunes chênes), les feuilles deviennent vert foncé ou rougeâtres. La croissance est ralentie, le feuillage est moins dense et la fructification faible.

Le phosphore est présent dans le sol sous forme minérale et sous forme organique (près de la moitié des réserves du sol).

Le phosphore a pour origine les apatites des roches-mères. Au cours des processus d'altération et de développement des sols les ions phosphates des apatites sont libérés par dissolution et peuvent être :

- utilisés par les plantes et micro-organismes ;
- incorporés à des composés organiques (humophosphates) ;
- transformés à nouveau en phosphates de fer, d'aluminium ou de calcium très peu solubles.

Il semble bien que l'anion phosphaté nutritif soit essentiellement $H_2PO_4^-$ et plus accessoirement d'autres anions comme HPO_4^{2-} ou des phosphates d'Al que l'on peut trouver dans les solutions du sol.

D'après certains auteurs, sous PH 6,8 , $H_2PO_4^-$ domine dans les solutions du sol ; au dessus de cette valeur, c'est l'ion HPO_4^{2-} . Le trivalent PO_4^{3-} ne devient important qu'au delà de PH 9.

La quantité d'ions phosphoriques en solution est faible.

A. Formes de fixation du phosphore dans le sol :

a. La fixation sur les argiles et les acides humiques :

la fixation est possible par l'intermédiaire des cations Ca^{++} (en milieu peu acide), Al^{+++} , Al(OH)^{++} , Al(OH)_2^+ (en milieu plus acide).

Elle peut également se faire directement sur les argiles par les charges positives des bordures.

b. Le calcaire actif :

il présente des propriétés absorbantes comparables à celles de l'argile, à condition que le PH ne s'élève pas au dessus de 7. Sinon, les phosphates précipitent sous formes de phosphates calciques, formes très stables.

c. Les hydroxydes de Fe et d'Al :

ceux-ci (Al(OH)_3 et Fe(OH)_3) ont un pouvoir adsorbant plus élevé mais libère assez difficilement le P, surtout en ce qui concerne l'alumine.

En classant les formes minérales de phosphore selon leur disponibilité, on a :

Forme A :

- humophosphates (phosphates liés aux matières humiques) ;
- formes échangeables de la fixation sur les argiles,...
- phosphates bicalciques de la solution du sol ;
- phosphates de la solution du sol.

Forme B :

- certains phosphates tricalciques et une partie des phosphates de fer ;
- phosphates d'alumine.

Forme C : le phosphore inclus :

- dans certains phosphates tricalciques (présence d'une quantité assez grande de calcaire actif),
- une partie des composés avec le fer

B. Nutrition en phosphore :

Le phosphore est essentiel dans la vie du peuplement : certains disent même que si l'on fertilise, le phosphore est le premier et parfois le seul élément à apporter (il est souvent le facteur limitant).

De plus le phosphore favorise la mycorhization mais son effet bénéfique est annulé si l'on lui ajoute de l'azote et du potassium.

Le phosphore n'est mobilisé que de façon progressive : la diffusion du phosphore dans la solution du sol est cent fois plus faible que celle du calcium. Les engrains phosphatés qui sont incorporés au sol, même s'ils sont solubles, s'immobilisent en général rapidement : le problème de la nutrition en phosphore est bien souvent lié à celui de la mobilisation des réserves, qui s'avère parfois difficile aussi bien en milieu acide, qu'en milieu neutre ou basique, l'optimum se situant à un PH 5,5 à 6.

En effet :

- en sols acides, le phosphore se fixe avec l'Al et le Fe pour former des composés peu solubles,
- en sol riches en calcaire actif, le phosphore forme des phosphates tricalciques qui liés au calcaire actif donne des composés franchement insolubles (on parle de rétrogradation du phosphore).

4. LES OLIGOELEMENTS :

A. Généralités :

Les oligoéléments sont indispensables à la vie des plantes et des organismes du sol : certains sont prélevés sous la forme cationique (Fe^{++} , Mn^{++} , Cu^{++} , Zn^{++}), d'autres sous la forme anionique (bore et molybdène). Bien qu'ils n'interviennent qu'à faible dose, leur rôle physiologique est considérable. Ils font partie de la constitutions de certaines enzymes : enzymes respiratoires (Cu, Fe), enzymes de photosynthèse (Mn, Fe, Zn, Cu), enzymes de la réduction des nitrates absorbés par la plante (Fe, Mo),.... Par ailleurs, le cuivre, le manganèse, le fer jouent un rôle important dans l'humification. Si les oligoéléments sont indispensables à faible dose, leur excès engendre des phénomènes de toxicité par leur action de blocage sur certains enzymes.

En ce qui concerne les carences, elles se manifestent sous la forme de taches, de décolorations localisées ou de « chlorose » généralisée des parties aériennes.

En dehors des carences induites par la pauvreté du substrat, deux autres types de carences sont possibles : l'une provient de l'insolubilisation d'un élément pouvant être abondant dans le sol (Fe, Cu, Mn, Zn , en milieu calcaire), l'autre de l'entraînement hors de portée des racines, sous la forme organique complexée mobile (chélates) en sols acides et filtrants.

En règle générale, si le PH s'élève, la solubilité des oligoéléments diminue ; si le PH s'abaisse, elle augmente. Le PH optimum se situe entre 6 et 6,5 afin d'éviter les risques de carences et les risques de toxicité (Cu devient toxique sous PH 5).

B. Cas du fer :

C'est l'ami du pédologue car ses composés fortement teintés colorent les sols, fournissant de ce fait, dès la phase d'observation d'un sol sur le terrain, de précieuses indications quant à son abondance et à son état (voir figure 11 ci-dessous):

- **blanc** : absence de fer ;
- **gris-bleu, gris-vert** : coloré par Fe^{++} : signe d'excès d'eau ;
- **bruns et ocre ou jaune** : hydroxydes de fer amorphe et hydroxydes de fer cristallisés (goethite) : conséquence d'un régime hydrique assez peu contrasté (le sol est souvent humide, mais sans excès ; les phases de sécheresse ne sont ni fréquentes ni excessives).
- **rouge** : oxydes de fer non hydratés cristallisés (hématite : Fe_2O_3) : conséquence d'un régime hydrique très contrasté, avec alternance fréquente d'une humidité forte mais aérée et d'une sécheresse accentuée.

- **taches de rouille** : hydroxydes de fer cristallisés (goethite). Signe d'hydromorphie temporaire.

L'altération des minéraux silicatés libère de l'alumine et du fer sous forme d'hydroxydes et d'ions Fe^{+++} et Al^{+++} . Tant que le PH reste très acide (PH inférieur à 5,5), ce sont surtout les ions Al^{+++} qui servent de pont entre l'argile et l'humus. Au fur et à mesure que le PH s'élève, les ions Fe^{+++} les remplacent formant le pont ferrique.

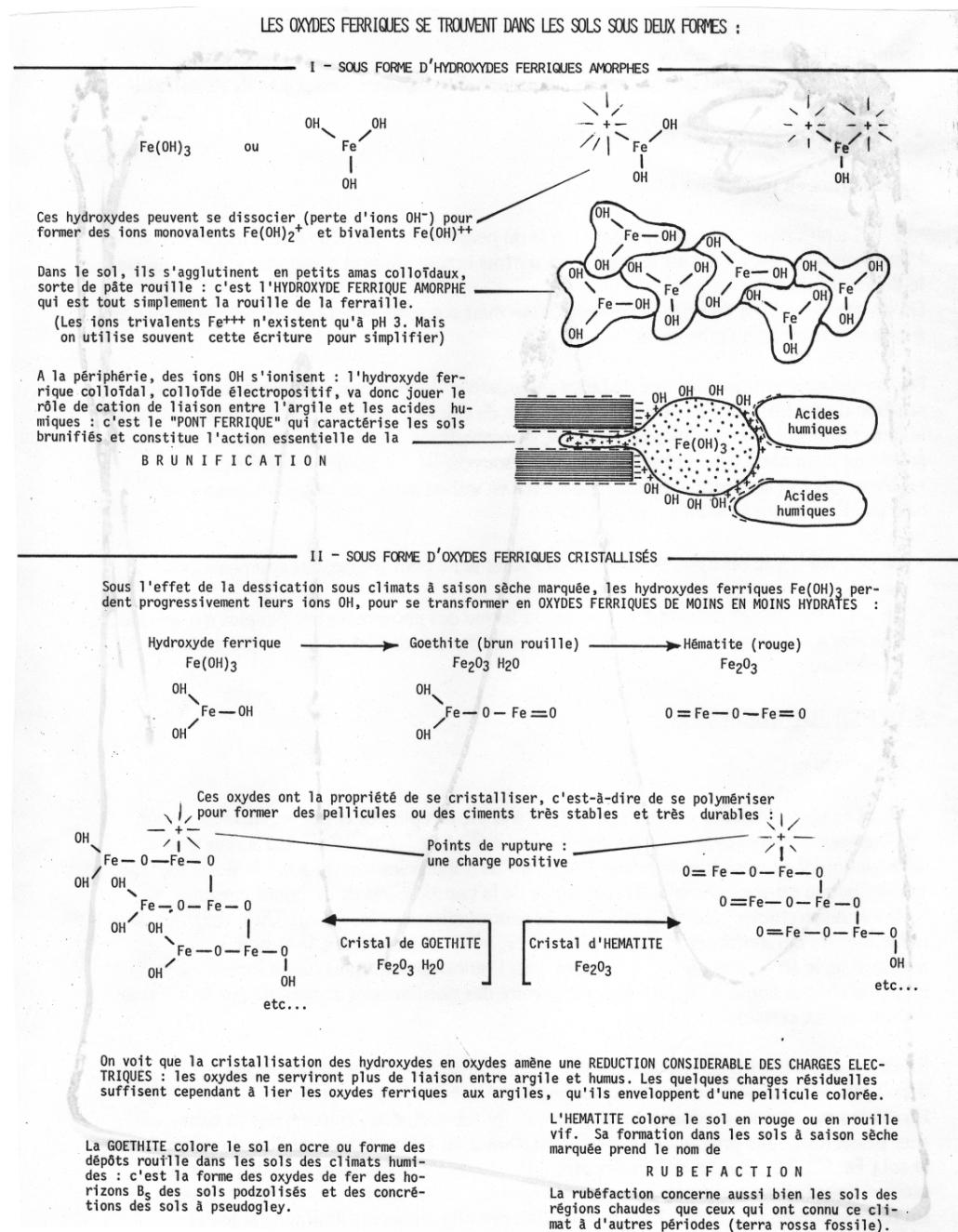


Figure 11 : Les états du fer dans le sols : oxydes ferriques (tiré de Soltner D., 1992)

C. Cas du Mn :

Le manganèse est l'un des oligoéléments les plus importants pour la croissance des végétaux ligneux. La plus grande partie du manganèse est présente sous forme d'oxydes manganiques trivalents ou tétravalents alors qu'une faible fraction se trouve à l'état de Mn^{2+} . Le Mn^{2+} se trouve à l'état soluble ou à l'état échangeable.

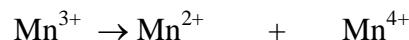
Les carences peuvent se rencontrer :

- en sols filtrants à la suite d'un lessivage intense ;
- en sols tourbeux pauvres en éléments minéraux ;
- en sols à PH neutre ou alcalin (diminution de la solubilité). C'est dans les sols calcaires que se manifeste le plus nettement la carence.

Dans les sols acides mal drainés et mal aérés, le passage des formes oxydées vers la forme réduite est favorisé. Il peut alors se produire des intoxications dues aux fortes concentrations de Mn^{2+} , surtout dans les sols où la circulation de l'eau est faible.

En France, on a montré qu'une accumulation dans l'humus conduit à un effet toxique de cet élément vis-à-vis des jeunes semis de Sapin pectiné dans les Vosges.

Le manganèse contenu dans les aiguilles de Sapin est sous forme réduite Mn^{2+} . Dans les mulls où la microflore oxydante est très active, il évolue vers une forme Mn^{3+} , dite manganèse facilement réductible qui s'insolubilise et peut, au cours de l'été, se dismuter :



MnO_2 reste insoluble tandis que Mn^{2+} se dissout : les solutions du sol étant alors très concentrées, puisque le sol contient peu d'eau, la toxicité apparaît.

Dans les moders et les mors au contraire, Mn^{2+} ne s'oxyde pas, reste en solution et est éliminé au cours de l'hiver par les eaux de drainage. De fait, dans les parcelles à régénération difficile, le manganèse facilement réductible est nettement plus abondant que dans les parcelles à régénération abondante. Nous verrons dans le cours d'écologie forestière que d'autres phénomènes (allélopathie) interviennent.

D. Cas du cuivre :

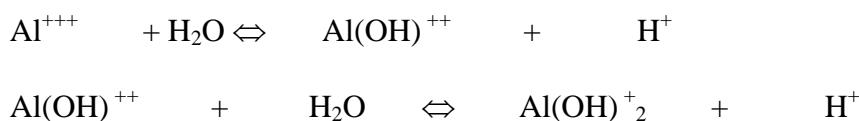
La carence en cuivre peut se manifester sur les sols se développant sur des roches pauvres en cet élément (certains granites, grès, sables). C'est ainsi que des carences en cuivre sont fréquentes sur Douglas et épicéa de Sitka en Limousin et en Bretagne). Chez le douglas, la carence en cuivre se caractérise par la formation de pousses retombantes et molles (aspect pleureur).

5. L'ALUMINIUM

Très abondant dans les sols, cet élément ne forme pas de produits colorés : il est donc tout à fait invisible sur le terrain et seules les analyses chimiques permettront de connaître son abondance et ses différentes formes.

Plus le sol est acide, plus l'aluminium se trouve sous des formes solubles donc assimilables par la plante, au point de devenir toxique.

En effet, sous l'action de la forte acidité, l'argile se dégrade avec libération d'ions Al^{+++} qui réagissent avec l'eau pour former des hydroxydes d'alumine Al(OH)^{++} et Al(OH)^{+}_2 , et des ions H^+ , selon les réactions :



L'effet toxique de l'aluminium intervient au niveau des racines. L'aluminium semble agir d'une part en **bloquant l'alimentation en phosphore** qui s'insolubilise à l'état de phosphate d'aluminium dans les racines, d'autre part en **limitant l'absorption de Ca et Mg** par occupation excessive des sites d'échange des racines.

L'excès d'aluminium entraîne un ralentissement de la croissance de la plupart des espèces végétales dont les **racines s'atrophient**, s'épaississent et s'enroulent sur elles-mêmes.

Prédominant à $\text{PH} < 4,5$, l'ions Al^{+++} est progressivement relayé par les ions hydroxyalumineux quand le PH atteint et dépasse 5.

L'apport d'amendement calcaire, sources d'ions OH^- a pour effet :

- de neutraliser les ions H^+ : le PH se relève ;
- d'insolubiliser les ions Al(OH)^{++} et Al(OH)^{+}_2 en formant de l'alumine insoluble Al(OH)_3 .

6. LE SOUFRE :

Le soufre, tout en ne figurant pas parmi les éléments minéraux principaux, est absorbé par les plantes en quantité non négligeable.

La plus grande partie du soufre se trouve dans la matière organique du sol. Après minéralisation, le soufre est libéré sous forme de sulfate.

Le soufre peut avoir aussi comme origine la réserve minérale du sol (décomposition du gypse, de pyrite par exemple) mais aussi le SO_2 de l'atmosphère qui retombe suite aux précipitations de pluie (ces apports sont estimés à 20-30 kg / ha / an).

Le soufre se trouve dans les plantes comme composant des protéines et dans certaines vitamines.

4ème PARTIE : CARACTERISTIQUES BIOCHIMIQUES DES HUMUS :

I. Le rapport C / N :

Au cours de la décomposition, les matières organiques perdent davantage de carbone (qui s'échappe sous forme de CO₂ suite à la décomposition de ces matières) que d'azote, dont une partie importante est réincorporée dans les molécules d'humus.

Le rapport C / N (horizon A) tend donc à baisser jusqu'à une valeur caractéristique du type d'humus formé :

- **C / N de l'ordre de 10 à 15 pour les humus du type mull ;**
- **C / N de l'ordre de 15 à 25 pour les humus du type moder ;**
- **C / N supérieur à 25 pour les humus de type mor.**

En fait, cette baisse varie selon les végétaux humifiés :

- **les débris végétaux riches en azote** (feuilles d'espèces telles qu'aulnes, frênes, légumineuses...) libèrent autant d'azote que de carbone. Le C/N baisse peu, passant par exemple de 15-20 dans OL à 10-15 dans l'horizon A ;
- **les débris végétaux à C/N plus élevé comme les pailles** (C/N supérieur à 50) libèrent beaucoup plus de carbone que d'azote. Le C/N s'abaisse beaucoup plus, passant de 50 à 10-15 ;
- **les débris végétaux à C/N très élevé comme les résineux et bruyères** (C/N supérieur à 80, végétaux dits « acidifiants ») ont une décomposition très lente. Ils perdent évidemment plus de carbone que d'azote, et le peu d'azote qu'ils possèdent est perdu par lessivage. Ils produisent donc un humus à C/N plus élevé, supérieur à 25.

La nitrification en forêt est en rapport assez étroit avec le rapport C/ N des horizons O et A. Un rapport C/ N bas de l'ensemble des horizons humifères traduit à la fois une évolution rapide de la matière végétale tombée au sol, donc un retour rapide des éléments nutritifs aux horizons prospectés par les racines et de bonnes possibilités d'alimentation azotée. Pour des essences exigeantes en azote nitrique telles que le frêne ou le peuplier, on considère que la nutrition azotée est correcte pour des C/ N inférieurs à 15-20 en A.

II. La capacité d'échange cationique (C.E.C) et le degré de saturation (V) :

Tout comme l'acidité, la C.E.C. augmente progressivement au cours des processus d'humification, ce qui fait que ce facteur constitue un bon indice de l'état de décomposition. On trouve dans la littérature des valeurs se rapportant à des matériaux à divers états d'évolution :

NATURE DES MATERIAUX	C.E.C (meq / 100 g)
aiguilles d'épicéa	14
résidus végétaux en décomposition (horizons O de pessière)	80
acides fulviques	300
acides humiques	350 à 600

Cette évolution est mise en évidence par l'étude détaillée des horizons O des moder et dysmoder. Nous savons déjà que dans ces formes d'humus, l'incorporation des substances humifiées au substrat minéral est très limité. Dans les mull, par contre, l'incorporation est (quasi)-complète et, de plus, il se forme des complexes argilo-humiques, bloquant des sites d'échanges. C'est pourquoi, au niveau des horizons Ah, on y observe une diminution de la C.E.C. Le tableau ci-dessous illustre bien cet ensemble de faits :

HORIZON	Mull	Mull dystrophe	Moder	Dysmoder
OL	-----	84,1	83,1	88,9
OF	80,0	84,7	95,7	112,8
OH	-----	-----	-----	124,4
Ah	34,1	41,2	78,0	66,8
A (ou Ah ₂ de moder)	16,8	23,3	34,3	28,3

Si la C.E.C. est moins élevée dans les mull, il en est de même pour l'acidité. D'autre part, les horizons humifères des sols à mull se montrent chimiquement plus riches que ceux des moder et des mor. L'influence combinée de ces divers facteurs se marque par une diminution du degré de saturation (V % = 100 . S / C.E.C.) dans le sens mull-mor.

Duchaufour (1988) cite les valeurs suivantes :

HUMUS	V %
Mull calcique	$\cong 100 \%$
Mull	20 à 60 %
Moder	10 à 20 %
Mor	moins de 10 %

III. Les mécanismes biochimiques de la formation de l'humus :

L'humification est un ensemble de synthèses faisant suite à la décomposition des matières organiques végétales.

Le processus de décomposition consistant en la simplification des molécules (bioréduction), les processus d'humification présentent des caractères nettement différents :

- ils consistent en une construction de nouvelles molécules de plus en plus grosses (ou polymérisées) à partir des molécules plus ou moins simplifiées obtenues par la décomposition des matières végétales.
- ils ne sont pas dûs uniquement à l'activité biologique : des agents physiques et des réactions chimiques en sont également responsables (voir chapitre III).

Comme nous l'avons vu au chapitre III, il existe trois grandes voies de l'humification : insolubilisation, héritage et néosynthèse microbienne (figure 12).

a) La voie de l'insolubilisation :

Les composés phénoliques solubles sont capables de s'associer pour former des acides créniques et hymatomélaniques, ainsi que des acides fulviques.

La polycondensation (ou polymérisation) se poursuivant (figure 11 ci-dessous), les acides fulviques donneront naissance aux acides humiques et enfin à l'humine d'insolubilisation.

Cette polycondensation se caractérise par plusieurs phénomènes :

- augmentation de la taille du noyau aromatique (ou nucléus) ;
- augmentation du poids moléculaire et diminution de la solubilité ;
- liaison de plus en plus forte avec la matière minérale. L'humine est très difficile à dissocier de l'argile, formant avec elle un « complexe argilo-humique » très stable.

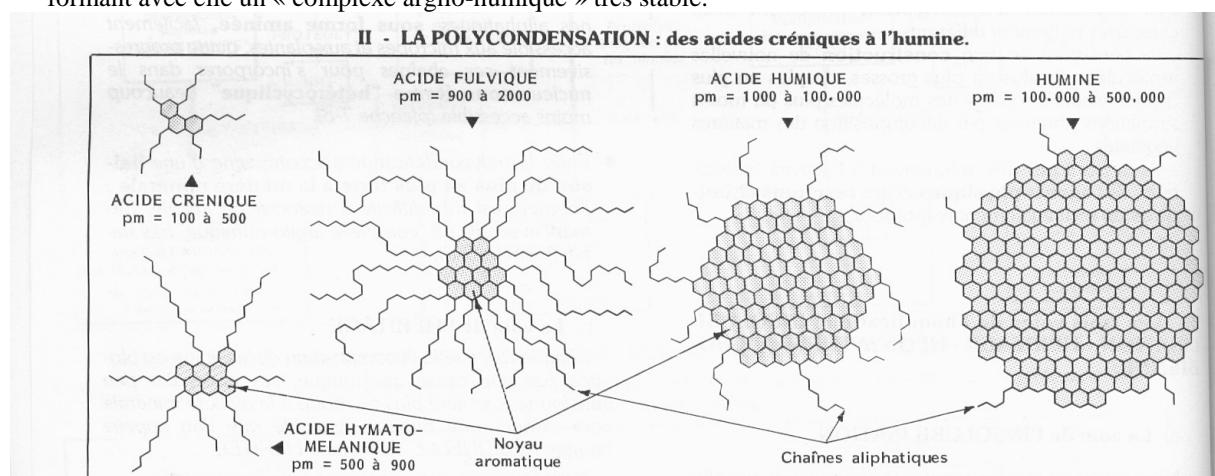


Figure 11 : La polymerisation des matières préhumiques (tiré de Soltner D., 1992)

b) La voie de l'héritage :

Chaque fois que la décomposition de la lignine est bloquée par une cause quelconque, ses molécules peu transformées se lient plus ou moins à la matière minérale pour donner une humine insoluble que l'on appelle humine résiduelle ou humine héritée.

Nous avons vu que ce blocage pouvait provenir (voir chapitre III) :

- soit d'un excès d'acidité ;
- soit au contraire d'un excès de calcaire actif, celui-ci formant autour de la lignine à demi décomposée une « carapace » calcaire.

c) La voie de la néosynthèse microbienne :

Certains micro-organismes ont la possibilité de reprendre des molécules simples issues de la minéralisation primaire, pour synthétiser leur propre substance. A leur mort, les polysaccharides issus de leur biodégradation peuvent se lier à la matière minérale pour former de l'humine de néosynthèse microbienne. Mais en fait les micro-organismes agissent à plusieurs niveaux de l'humification :

- ils **synthétisent nous venons de le dire l'humine microbienne**. Celle-ci représente dans les sols à la fois aérés et recevant beaucoup de résidus organiques riches en cellulose, jusqu'à 10 % de l'humine totale. Une humine en longues chaînes plutôt qu'en grosses molécules rondes. De ce fait, cette humine microbienne a des propriétés agglutinantes très supérieures, d'où son rôle sur la stabilité de la structure. Mais elle disparaît plus rapidement que les autres humines et doit donc être souvent remplacée.
- ils **synthétisent aussi quelques composés phénoliques solubles**, qui par polycondensation donnent des acides humiques.
- ils **fournissent enfin des chaînes aliphatiques** qui s'accrochent aux noyaux aromatiques des acides fulviques et humiques.

Ces synthèses d'humus par voie microbienne se font surtout à partir des sucres, de la cellulose et des matières azotées.

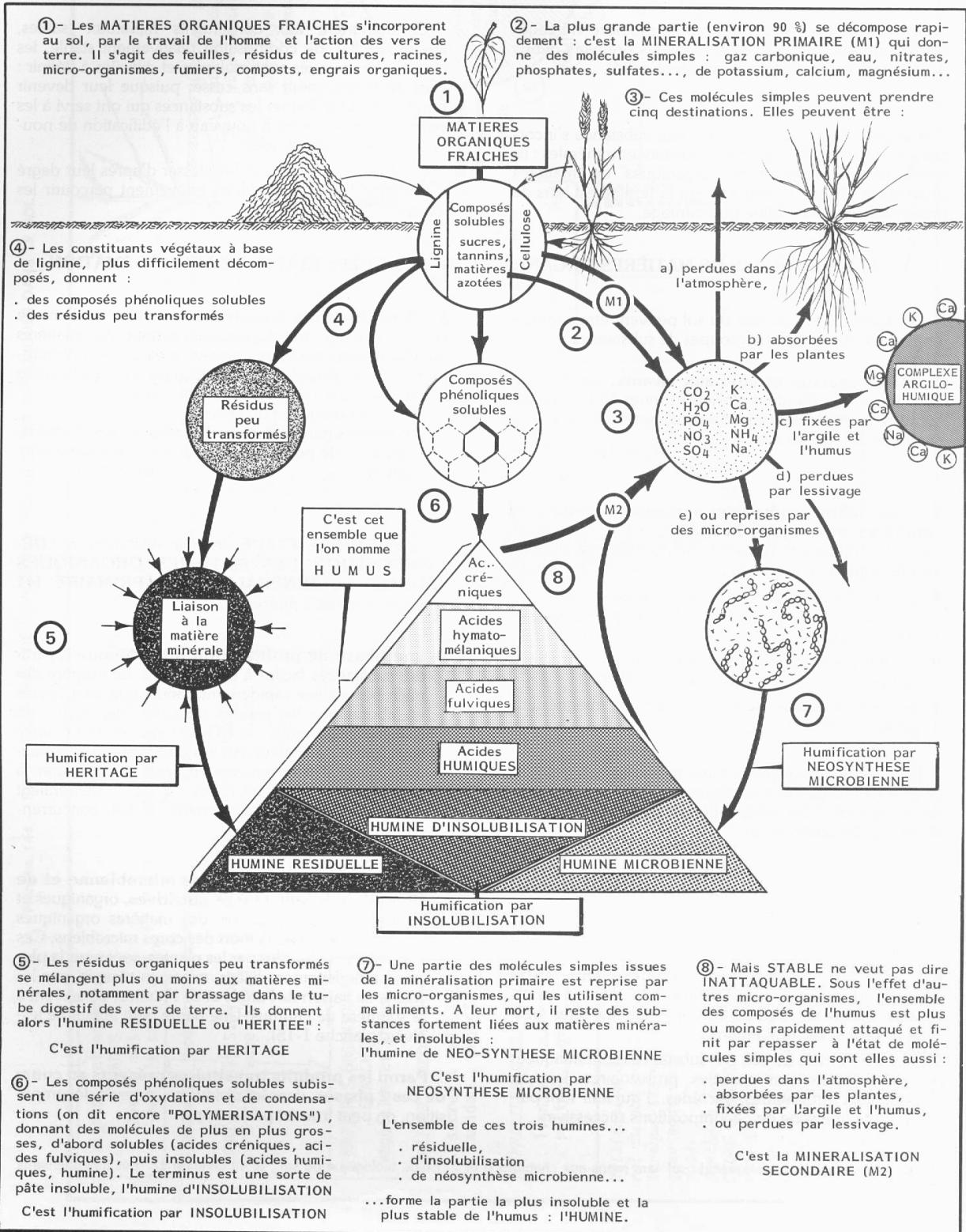


Figure 12 : Le cycle de l'humus (tiré de Soltner D. ,1992)

IV. Le complexe argilo-humique :

1. L'humus « protège » l'argile et stabilise la structure du sol.

Les molécules d'humus, électronégatives comme celles de l'argile, ne peuvent se fixer directement sur elles. Pourtant argile et humus sont associés en un complexe, cette liaison étant rendue possible par trois procédés (figure 13 ci-dessous) :

- **par l'intermédiaire des ions Ca^{++}** formant un « pont » entre l'argile et l'humus. Ce mode de fixation, particulièrement énergique, explique la stabilité (c'est-à-dire la résistance à la dispersion par l'eau, et à la destruction de l'humus par minéralisation) des agrégats formés en sol calcaire ;
- **par l'intermédiaire du fer (Fe^{3+}),** ce mode de liaison caractérisant les BRUNISOLS (« sols bruns »). Cette liaison est cependant moins stable que celle qu'assure le calcium.
- **par fixation directe de l'humus sur certaines charges positives de l'argile** : les charges dues par exemple à l'échange des ions OH^- fixés sur les Al^{3+} des feuillets d'argile.

Dans cette association argile-humus, les molécules d'humus forment autour des micelles d'argile une enveloppe protectrice.

La couche d'eau qui les entoure tend alors à s'opposer à la flocculation de l'ensemble. Mais inversement, lorsque le complexe argilo-humique est floqué, l'humus s'oppose à toute nouvelle dispersion de l'argile, qui serait provoquée par exemple par un excès d'humidité, ou par la battance des pluies en surface : **l'humus protège l'argile contre la dispersion, c'est un colloïde stabilisateur.**

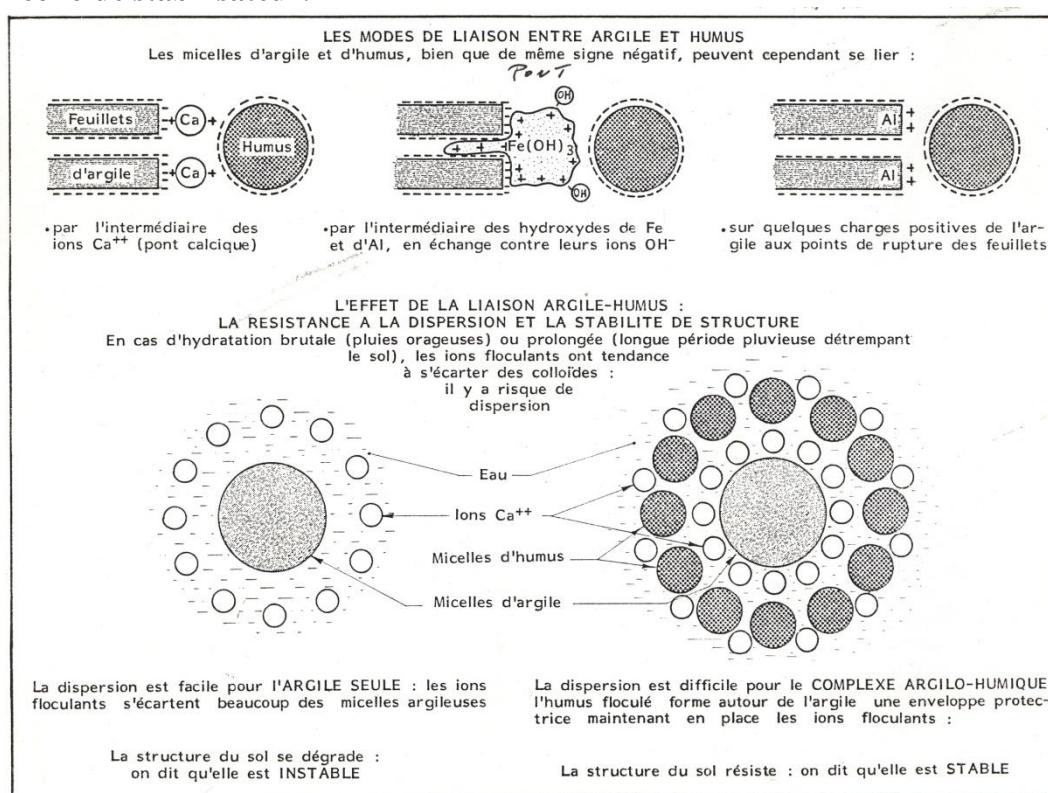


Figure 13 : Les modes de liaison entre argile et humus (tiré de Soltner D., 1992)

On dit encore que l'humus stabilise la structure, c'est-à-dire qu'il forme avec l'argile un « ciment » qui permet la construction d'agrégats solides, résistant à la dégradation par l'eau.

2. L'argile favorise l'humification et ralentit la destruction de l'humus.

En contrepartie, l'argile protège l'humus contre l'attaque microbienne. On remarque en effet qu'en sol suffisamment argileux et bien pourvu en calcium, l'humification est favorisée par la liaison à l'argile, liaison réalisée notamment par les vers de terre, et la minéralisation de cet humus est freinée (acides humiques gris).

En sol sableux et pauvre en calcium au contraire, l'humus est souvent constitué de composés solubles (surtout acides fulviques peu polymérisés) donc dépourvus de propriétés colloïdales intéressantes, faute de liaison avec l'argile. Si le sol est bien pourvu en calcium, les acides humiques qui se forment disparaissent vite faute de liaison à l'argile.

3. La stabilisation de l'humus par les ions du sol :

a) Le fer : le plus souvent sous forme d'ions ferriques Fe(OH)_2^+ ou Fe(OH)^{++} , libres ou associés aux feuillets d'argile, exerce sur l'humification une double action (figure 14) :

- **il insolabilise les composés phénoliques solubles** (encore appelés « précurseurs humiques») et favorise leur polymérisation. **En présence d'ions ferriques abondants** (grès ou schistes ferrugineux), l'humification par insolabilisation est active : il se forme des acides humiques et de l'humine d'insolabilisation.

Au contraire, en **sols pauvres en fer** (sables quartzeux par exemple), les composés **phénoliques solubles ne peuvent s'insolabiliser et se polymériser**. Ils migrent en profondeur.

- **il sert de « pont » (pont ferrique) entre l'argile et l'humus.** On dit encore qu'il tient lieu de « cation de liaison » pour former le complexe argilo-humique. Mais la stabilisation du fer n'est pas trop énergique : les acides humiques (surtout bruns) et l'humine d'insolabilisation formés en milieu riche en fer sont facilement biodégradables. L'humus est stabilisé mais non bloqué. Nous verrons plus loin les intéressantes conséquences agronomiques.

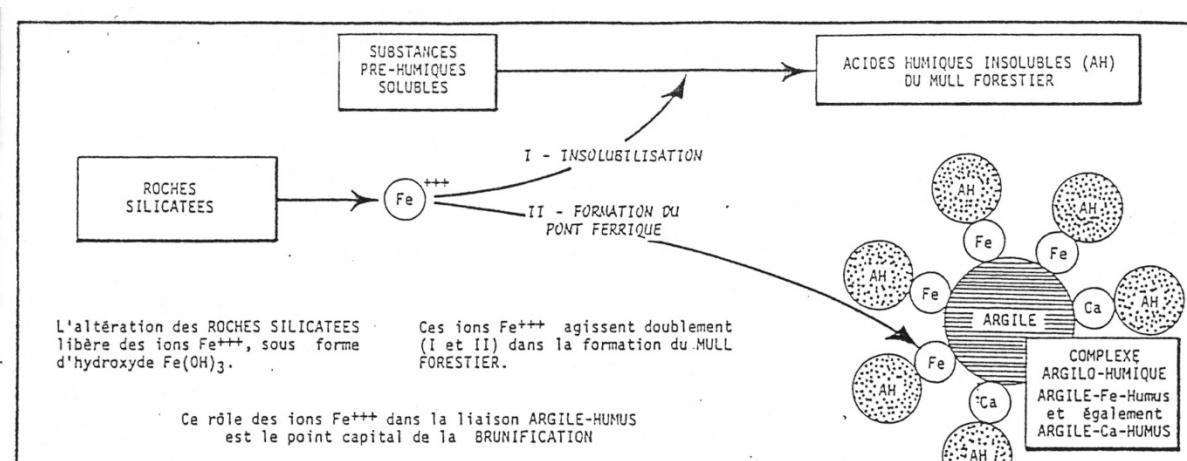


Figure 14 : Le rôle du fer : ponts ferriques (tiré de Soltner D., 1992)

b) L'aluminium : sous forme d'hydroxyde Al(OH)_3 et d'ions alumineux Al(OH)_2^+ ou Al(OH)^{++} , il se comporte vis-à-vis des composés humiques de la même manière que les ions Fe. Mais lorsque l'alumine se trouve à l'état de gels amorphes libérés en grande quantité par la décomposition des laves et cendres volcaniques (gels appelés allophanes), cette alumine se comporte comme un stabilisant puissant ; les acides fulviques et humiques sont tellement enrobés d'alumine qu'ils deviennent inattaquables par les microbes et s'accumulent.

c) Le calcium : intervient différemment selon sa quantité dans le sol :

En **quantité modérée**, les **ions Ca agissent comme le fer** : ils participent à l'insolubilisation et à la polymérisation des « précurseurs humiques », et servent de cations de liaison entre l'argile et l'humus : c'est le « **pont calcique** » indispensable à la constitution du complexe argilo-humique.

Mais tout change en présence de quantités abondantes de calcaire actif :

- les ions Ca⁺⁺ surabondants précipitent les acides fulviques en fulvates et humates calciques, **très résistants à la biodégradation** ;
- le bicarbonate de Ca, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ se recristallise en carbonate de calcium CaCO_3 (cristaux de calcite) autour de l'humus formé et des résidus de lignine peu transformée, formant autour de cet humus une gangue calcaire spectaculaire lorsqu'on l'observe au microscope électronique. Cette gangue limite aussi la biodégradation de l'humus, qui s'accumule.

V. Fonctionnement biologique des humus et cycles biogéochimiques:

1. MULL :

Les eumulls sont des humus à forte activité de vers de terre assurant une incorporation rapide et profonde de la matière organique aux horizons minéraux et sa complexation avec les argiles. L'horizon A est biomacrostructuré : la structure est d'origine biologique, dûe principalement à l'activité des vers de terre. Les humines intervenant majoritairement dans le CAH sont l'humine microbienne et l'humine organo-argilique (fabriquée lors de la digestion des vers de terre).

Dans les oligomulls et les dysmulls, cette activité des vers, plus faible ou presque nulle, est accompagnée d'une forte activité de pourritures blanches entraînant la présence d'horizons OLv, voire OF. Lorsque l'activité des vers de terre est très faible, relayée par une forte activité mycolytique (champignons de pourriture blanche), il n'y a pas de macro-structuration biologique : la structure, microgrumeleuse, résulte de précipitations physico-chimiques (l'humine d'insolubilisation devient majoritaire dans les complexes humiques).

Le taux de minéralisation est important et augmente des formes oligomull vers les formes eumull. La disponibilité en azote et autres éléments (cations, phosphore) est bonne (sauf pour les types d'humus carbonatés). Il n'y a pas de problèmes de toxicité aluminique.

Eumull (eu = bien) :

On y observe une **disparition totale et rapide des matières organiques fraîches** (OL peut être sporadique, ou même quasi-absent en fin de printemps).
L'activité des vers de terre anéciques³ est très forte, l'incorporation de la matière organique importante, les composés d'insolubilisation et les **complexes argilo-humiques très bien développés**.
Le PH est généralement élevé (supérieur à 6) et le taux de saturation souvent supérieur à 75 %. Mais ces deux derniers caractères ne sont pas obligatoires : il existe des eumulls désaturés (d'où l'importance du diagnostique des horizons).

Sauf pour les eumulls carbonatés, le **taux de minéralisation de l'azote est élevé** et assure une forte disponibilité en cet élément.

Dans le cas des eumulls carbonatés à horizon Ah noir et épais, on note, malgré une forte activité biologique, que la minéralisation secondaire est bloquée et que la matière organique humique s'accumule. De plus, la quantité d'éléments libérés est proportionnellement très faible.

Mésomull (méso=moyen) :

Mull à morphologie et vitesse de disparition des matières organiques fraîches intermédiaires entre eumull et oligomull.

L'horizon **OL est toujours présent**, en toutes saisons, jamais très épais ; OLn est continu ; OLv est sporadique et peu épais. L'activité des vers anéciques est ralentie dans des conditions

³En fonction, notamment de leur statut écologique, les lombricides sont répartis en trois catégories : les anéciques, les endogés et les épigés. Chacune de ces catégories a aussi des caractères morphologiques et physiologiques distincts, mais dans un but de clareté, ne seront développées ici que les différences écologiques.

1. LES ANECIQUES sont de gros vers de terre creusant des galeries subverticales parfois profondes de deux mètres. Ils se nourrissent la nuit, en surface, de matières organiques (litière), qu'ils mélangent à la terre, prise en profondeur, que contient leur tube digestif. Dans les sols fertiles de l'Europe tempérée, ils sont dominants. Ils sont responsables des tortillons de terre qui sont déposés à la surface et favorisent grandement les qualités biologiques d'un sol (meilleure infiltration de l'eau, aération, recyclage des matières organiques mortes, bonne stabilité et structure des sols, lutte contre le tassement, activation de la microflore,...). Les vers anéciques ont une importance écologique énorme : c'est le seul groupe qui assure le mélange et les liens entre la matière inorganique et la matière organique.

2. Les ENDOGES se nourrissent surtout des divers débris organiques se trouvant dans le sol. Leur reproduction est souvent modeste. Ceci s'explique peut-être par le fait que, sous terre, ils sont à l'abri des prédateurs. Ils jouent un rôle complémentaire à celui des anéciques dans la fertilité biologique des sols. Les membres de ce groupe restent en permanence dans le sol, dans des galeries essentiellement horizontales.

3. LES EPIGES vivent à la surface du sol, dans des accumulations de matières organiques (litières, fèces de bétail) et sous l'écorce des arbres. Leur taille est petite et leur croissance rapide. Ils se reproduisent beaucoup, peut-être parce qu'ils sont la proie de nombreux prédateurs (taupe, limaces à coquilles, merles, hérissons, corneilles, pies, rouge-gorge,...).

Les membres de ce dernier groupe sont incapables de creuser la terre. Ils sont le plus souvent très colorés : rouges, rouge-vineux ou rosés.

de milieu un peu moins favorables. L'horizon A est moins épais (quelques cm) à structuration moins stable que dans l'eumull.

Le PH de l'horizon A est fréquemment compris entre 5 et 6, le rapport S/T entre 30 et 70 %, mais ce caractère n'est pas obligatoire.

Oligomull (oligo = peu) :

Mull à disparition lente des litières, fonctionnement biologique ralenti.
L'horizon OL est continu ; OLv est très bien développé et présente une activité nette des pourritures blanches. L'horizon A est peu épais et peu humifère, sa structure est faiblement grumeleuse, très fine dans l'oligomull mycogène à horizon A d'insolubilisation (agrégats de un à quelques mm).

Exemple : oligomull mycogène désaturé acide : fréquent dans les hêtraies lorraines : PH inférieur à 5, rapport S / T inférieur à 30 %.

Dysmull (dys = difficulté, mauvais état) :

Mull à fonctionnement biologique très ralenti. On y observe un OF qui indique que le fonctionnement biologique des horizons holorganiques est proche de celui des moders, mais celui de l'horizon A est encore celui d'un mull.

2. MODER :

Les MODER sont caractérisé morphologiquement par la présence des horizons **OL, OF et OH**. Le passage est très progressif entre les horizons OH et A : sur le terrain, la limite entre OH et A est souvent difficile à situer (d'où la possibilité de nommer la partie de OH en transition vers A en utilisant le terme OAh).

La destruction des litières est due principalement, en l'absence des vers de terre anéciques, à la mésofaune (larve de diptères, vers enchytraeides, arthropodes) et à la macrofaune de surface (isopodes, diplopodes, lombrics épigés, mollusques). **L'activité des vers de terre est très faible à nulle**. Transformation et incorporation sont donc faibles. L'activités des pourritures blanches peut encore être sensible.

Il n'y a pas d'humine d'insolubilisation (le milieu ne permet pas l'insolubilisation des composés phénoliques solubles), ni d'humine organo-argilique ; l'humine microbienne est peu abondante. Par contre, la matière organique est sous forme d'**humine héritée majoritaire, sous forme de boulettes fécales** (digestion quasi nulle des pigments bruns par la faune du sol).

L'horizon A est **un horizon A de juxtaposition** c'est-à-dire qu'il n'y a pas (ou presque) de liaison matière organique-matière minérale (**pas ou peu de CAH**) : la matière organique humifiée est sous forme de boulettes fécales (couleur brune) de la mésofaune

juxtaposées aux particules minérales. Lorsque l'horizon A comporte une fraction sableuse, on peut appercevoir que la matière organique apparaît juxtaposée aux **grains de sable nus et brillants**.

Les MODER se développent lorsque les conditions écologiques sont défavorables à l'activité des vers de terre anéciques :

- PH bas (inférieur à 5) associé quelques fois à des textures défavorables (sableuses) ou à résidus végétaux à fort rapport C/N ;
- température basse (montagne, zone boréale) ;
- sécheresse ;
- asphyxie (hydromorphie).

Les MODER présentent généralement des **PH très acides (inférieur à 4,5)**, les **rapports C/ N sont élevés** (18 à 25 en A, jusqu'à 30 en OH) et le **taux de minéralisation est assez faible (donc faible disponibilité en éléments minéraux (azote, cations))**. Ces derniers sont donc bloqués dans les couches holorganiques. Si le facteur limitant l'activité biologique est l'acidité, il existe des **possibilités de toxicité aluminiques et des blocages du phosphore**. Les moders correspondent, dans ces conditions, à des **niveaux trophiques faibles**.

Les principaux types de MODER sont :

Hemimoder :

Succession des horizons OL, OF et A. L'horizon OH est peu ou pas développé. Morphologiquement, ce n'est pas un MULL à cause de la présence d'un horizon A de juxtaposition. Par contre l'hémimoder a le fonctionnement biologique d'un MODER.

Eumoder :

Succession d'horizon : OL, OF, OH, A.

L'horizon OH, toujours présent est mince (moins de un cm), parfois discontinu.

Dysmoder :

Succession d'horizon : OL, OF, OH, A.

L'horizon OH prend une plus grande importance : il fait plus de un cm.

3. MOR :

Cette forme d'humus est caractérisé par la succession des horizons **OL, OF, OH. La transition est très rapide entre OH et l'horizon minéral sous-jacent**. Ce dernier est un horizon où l'on peut trouver de la matière organique de diffusion. Il est plus ou moins humifère et particulière. Il peut contenir quelques boulettes fécales correspondant à la consommation de racines par une faune peu active.

Les mors correspondent vraisemblablement à des milieux où l'activité faunique est beaucoup plus faible que dans les moders, les **horizons OF et OH étant en conséquence**

plus pauvres en boulettes fécales et au contraire riches en filaments mycéliens et résidus transformés. Cette activité faunique est en tout cas spécifique, les échanges entre horizons organiques et minéraux étant quasiment nuls. La transformation de la matière organique est très faible et lente en l'absence d'activité animale notable : **humine héritée dominante**, composés organiques solubles non insolubilisés. **L'incorporation de matière organique au sol minéral ne peut se faire que par diffusion de ces composés.**

Les mors correspondent à des conditions écologiques très défavorables à toute activité animale :

- très forte acidité du sol associée à la présence de végétaux à résidus difficilement biodégradables ou à sécrétions toxiques (certains résineux, Ericacées) ;
- climat limitant l'activité biologique (froid) ;
- engorgement prolongé (hydromor).

Les mors sont des milieux à **très faibles niveaux trophiques** : **PH très bas** (inférieur ou très inférieur à 4,5) et **taux de minéralisation de l'azote très faible**. De plus, ils constituent un obstacle à l'infiltration de l'eau et sont défavorables à la germination : toxicité et sécheresse.