



# Guide d'observation de la fertilité des sols forestiers

Pour une sylviculture de préservation des sols

- Comprendre
- Observer
- Diagnostiquer

Version non définitive, appelée à  
être modifiée- fait le 28/06/2018



## TABLE DES MATIÈRES

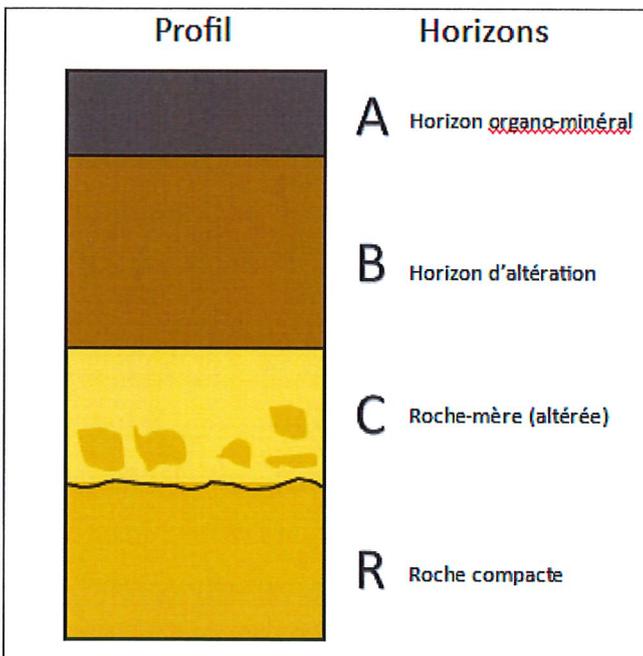
INTRODUCTION.....	4
DÉTERMINER LE TYPE D'HUMUS DE SON SOL.....	5
DÉTERMINER LA TEXTURE DE SON SOL.....	8
➤ Texture générale.....	8
➤ Réaction à l'HCL.....	11
DÉTERMINER LE PH DE SON SOL.....	12
➤ Les différents tests : .....	12
➤ Espèces végétales indicatrices du pH des chênaies et hêtraies (CRPFAquitaine 2005) :.....	14
FERTILITÉ PHYSIQUE.....	18
➤ La consistance (facultatif).....	18
➤ La stabilité.....	18
➤ La porosité ou compacité .....	18
➤ Traces d'hydromorphies.....	20
FERTILITÉ BIOLOGIQUE.....	21
➤ Les bactéries .....	21
➤ Les actinomycètes .....	21
➤ Les champignons : .....	22
➤ La faune du sol.....	22
FERTILITÉ CHIMIQUE :.....	25
➤ Le complexe absorbant .....	25
➤ La capacité d'échange cationique (CEC) .....	25
➤ Le taux de saturation ( $V = S/CEC\%$ ).....	26
➤ Le pouvoir tampon du sol.....	27
➤ Nutrition des plantes.....	27
➤ Réserves d'azote organique et nutrition azotée .....	28
GESTION DURABLE DE LA FERTILITÉ DES SOLS FORESTIERS.....	30
CONCLUSION.....	31
BIBLIOGRAPHIE.....	32
ANNEXES.....	34

# INTRODUCTION

## Qu'est-ce que la fertilité d'un sol ?

La fertilité d'un sol s'observe à travers de nombreux critères. Certains sont facilement accessibles, comme la texture, le pH, et d'autres nécessitent une analyse de sol en laboratoire. Néanmoins, ce guide a pour but d'aider le propriétaire forestier à estimer la fertilité de son sol, de la manière la plus accessible possible, et à moindre coût. Il traitera aussi des analyses de sols, afin que chacun puisse les interpréter, et confirmer les résultats trouvés grâce aux premières méthodes.

La fertilité d'un sol se décompose selon trois types de fertilité. **La fertilité chimique, physique et biologique**, en interaction directe les unes avec les autres. La **fertilité chimique** est la plus évidente, elle traduit la capacité du sol à fournir, retenir et recycler des éléments. Ce sont les résultats que l'on obtient lorsque l'on fait une analyse de sol ou un diagnostic foliaire, et seront traités en dernier dans ce guide. La **fertilité physique** traduit la structure du sol, son état de porosité et sa résistance, elle dépend essentiellement de la texture du sol, et de la « vie » qu'il contient. Enfin la **fertilité biologique** traduit la diversité biologique du sol, c'est-à-dire la quantité d'organismes vivants et morts présents dans le sol.



Le sol se divise la plupart du temps en **trois grands types d'horizons**<sup>1</sup>. L'**horizon A**, composé de **débris organiques** (feuilles, aiguilles, brindilles etc.) et de **l'humus** ; incorporation progressive de la matière organique (M.O.) dans le sol, qui est plutôt de couleur sombre.

L'**horizon B**, horizon **minéral**, issu de l'altération de la roche-mère sous-jacente dû à son contact avec l'horizon A, plutôt de couleur brun. Il peut être amené à se dédoubler dans les sols les plus évolués, donnant ainsi un horizon supérieur (E) plus clair et plus appauvri en substances minérales.

L'**horizon C**, **roche-mère** en voie d'altération, qui a donné naissance au sol. Il matérialise la transition avec le sous-sol roche dure, peu ou pas altérée (R, qui n'est pas un horizon du sol). (Charnet 2018)

La succession des horizons observés définit le **profil pédologique**.

Ce guide reprendra les trois types de fertilité du sol, en commençant par un chapitre sur l'humus du sol, ainsi qu'un chapitre sur la structure du sol et son pH, qui sont des notions très importantes. Pour bien comprendre le fonctionnement d'un sol, il est préférable de lire le guide en entier, certains chapitres faisant appel à d'autres.

<sup>1</sup> Les différents horizons (couches) du sol qui se distinguent les unes des autres par leur composition et leur épaisseur (couleur, texture etc.) (Colucci et al. s. d.)

## DÉTERMINER LE TYPE D'HUMUS DE SON SOL

Il existe différents types d'humus que l'on retrouvera sur nos sols forestiers. L'humus est formé à partir de la matière organique fraîche<sup>2</sup> (M.O.F.) par décomposition microbienne, la minéralisation, qui se réorganise avec pour former des composés plus complexes, l'humification, avant de subir une dernière minéralisation plus lente (Schéma 1). Ainsi est créé la matière organique « stable » dit humus.

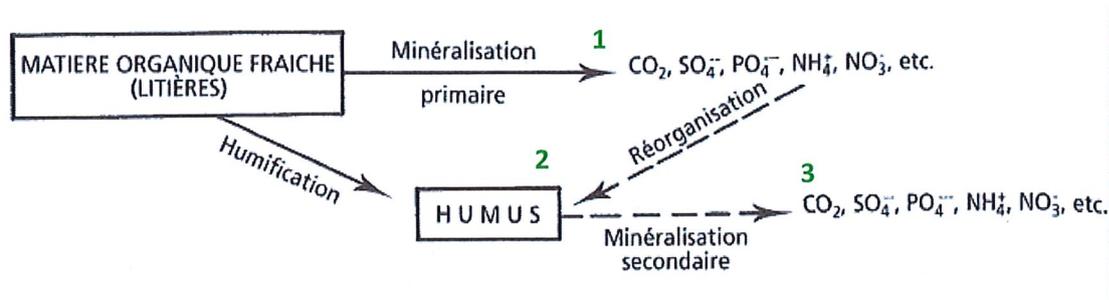
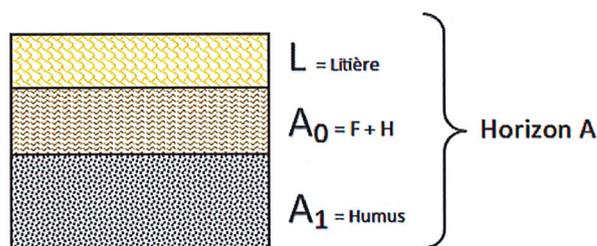


Schéma 1 : Les différentes étapes de minéralisation dans le sol

L'Horizon de la litière s'appelle L. Il contient la M.O.F, c'est-à-dire les débris végétaux qui ne sont pas encore en décomposition (feuilles, branches etc.).

L'horizon avec la matière organique en décomposition s'appelle souvent A<sub>0</sub>, il peut comprendre les horizons F et H. Il contient des débris végétaux en voie de décomposition mais encore reconnaissable (feuilles altérées ou troués etc.).



L'horizon de l'humus A<sub>1</sub>, composé de matières organiques en décomposition, non reconnaissable et riche en éléments nutritifs, mélanger à de la terre minérale de l'horizon B.

<sup>2</sup> Se dit des débris d'origine végétale, animal, fongique et bactérienne. En opposition à la matière organique vivantes (M.O.V.) et la matière organique stable (M.O. Stable).

Il existe, grosso modo, trois grands types d'humus (Figure 1), ici le terme « humus » fera référence à l'horizon A (L+A<sub>0</sub>+A<sub>1</sub>), par simplification. (Duchaufour 2001):

1. Les **mor** et **moder** : qui sont des humus peu actifs, composés d'un horizon L et A<sub>0</sub> peu transformés. A<sub>0</sub> est souvent divisé en deux parties, la couche F, dite de fragmentation, composé de débris végétaux grossier, et la couche H noire et formée de matière organique fine. La transition entre A<sub>0</sub> et A<sub>1</sub> est assez brutale pour les *mor*, et plutôt progressive pour les *moder*. La MOF en surface n'est pas décomposée assez rapidement et s'accumule.
2. Les **mull** : humus actifs à décomposition rapide. L'horizon A<sub>0</sub> est le plus souvent réduit à la litière L, et l'horizon A<sub>1</sub> à une structure aérée, en agrégats de différentes tailles et bien distinct de L. La MOF n'a pas le temps de s'accumuler en surface.

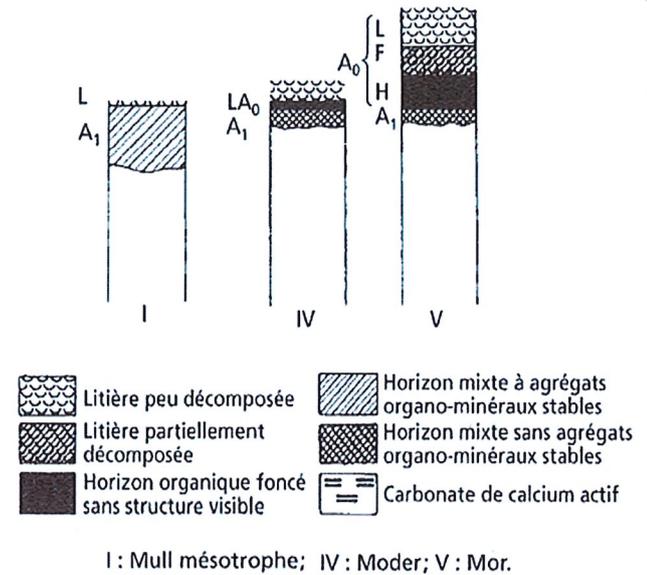


Figure 1 : Morphologie des principaux types d'humus forestiers tempérés (milieux aérés)

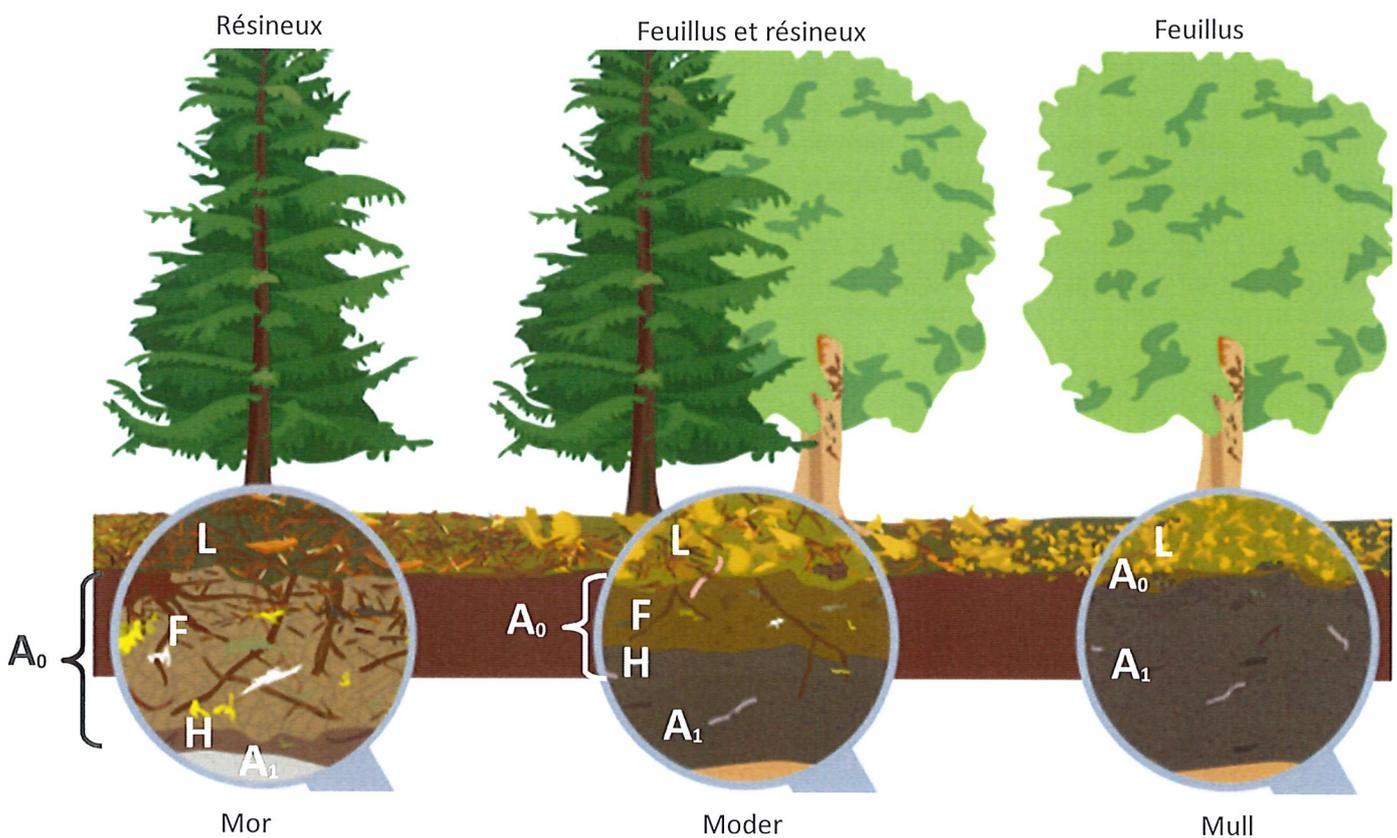


Figure 2 Différence pédologique entre un mor, un moder et un mull

Les humus de type *mor* se retrouvent plutôt dans les forêts de résineux, dans des sols de type podzol<sup>3</sup>, alors que les *moder* se retrouvent plutôt dans des forêts de feuillus et de résineux avec une pauvre végétation herbacée. Quant aux

<sup>3</sup> Sol acide, très délavé des climats froids

humus de type *mull*, on les retrouve souvent dans les forêts de feuillus avec une végétation herbacée riche. (Figure 2 , (Judy Chan 2015)).

C'est dans les humus de type *mull* qu'on retrouvera la plus grande diversité au niveau de la biomasse microbienne, composé de la microflore (bactéries, champignons et mycorhizes) et de la faune du sol (méga-, macro-, méso-, microfaune) (*Voir § Fertilité biologique*).

**Les *mull* sont associés aux sols les plus fertiles, ou la disponibilité en éléments nutritifs est la plus élevée.** En général, les *mull* forestiers ont un pH avoisinant les 5,5 et le ratio C/N est entre 10 et 20 (*Voir § Fertilité Chimique*). Dans tous les cas, ce ratio reste plus faible chez les humus de type *mull* que pour les humus de type *mor* ou *moder*. (Poirier 2015).

#### Pour aller plus loin

Les *mull* bien aérés peuvent être sous divisé en deux catégories :

Les vermimulls, horizon A1 zoogénique développé à la suite de l'action primaire des vers de terre

Les rhizomulls, développé à partir d'un réseau dense de fines racines formant un horizon rhizogénique.

Les *moder*, quant à eux, sont un intermédiaire entre les *mull* et les *mor*. En effet, **ils possèdent une activité biologique qui décompose partiellement les matières organiques présentes, mais laisse néanmoins une accumulation de celle-ci se faire niveau du sol.** Le type de *moder* que l'on pourra rencontrer en sol forestier est généralement peu acide, avec un rapport C/N autour de 20. On le retrouvera dans des sols où les conditions sont défavorables à l'activité des vers de terre anéciques (*Voir § Fertilité Biologique*) : pH inférieur à 5, textures sableuses, débris de végétaux difficilement décomposables et températures froides. La biomasse microbienne y est principalement de type fongique, vu l'acidité du sol.

Les humus de type *mor* sont peu actifs et peu évolués. **La matière organique s'accumule en surface**, et le passage est brutale entre les horizons organiques et minéraux. Le pH d'un *mor* est généralement acide à très acide et la ratio C/N est entre 25 et 40. **Ces humus évoluent dans des environnements causant une accumulation maximale de matières organiques et un relâchement minimal des éléments nutritifs.** L'activité biologique y est donc très faible, est les microorganismes présents en majorité sont les champignons cellulotiques. (Poirier 2015)

L'observation attentive de l'humus nous indiquera donc beaucoup sur la nature et la fertilité de de son sol forestier. Il est important de déterminer le plus précisément possible le type d'humus présent (*mur*, *moder* ou *mull*)<sup>4</sup> afin de connaître la richesse de son sol tant au niveau de la disponibilité des éléments que de la biomasse microbienne. Nous aurons, grâce à cette identification, également une idée du pH de notre sol et de son rapport C/N.

Les éléments comme le rapport C/N ou le pH sont détaillés dans la suite de ce guide, et sont donnés ici à titre d'informations.

<sup>4</sup> Pour encore plus de précision, voir les articles « Une classification morphologique et fonctionnelle des formes d'humus » de (Jabiol et al. 1994) et « Les humus forestiers » de (Toutain 1981)

# DÉTERMINER LA TEXTURE DE SON SOL

## ➤ Texture générale

Le type de sol est également très important pour avoir plus de précision quant à la fertilité de celui-ci, ainsi que sa capacité à retenir l'eau, et à la rendre disponible pour les arbres. On peut déterminer son type de sol avec la méthode du boudin, qui renseigne essentiellement sur le taux d'argile (Figure 3) :

### III. Connaitre la texture de mon sol

#### 1) Méthode du boudin

- 1) Prélevez un petit échantillon de terre humide et de la malaxer dans vos mains jusqu'à obtenir une boule de terre.
- 2) Si vous parvenez à former une boule mais que celle-ci reste friable et se désagrège dès lors que vous commencez à la manipuler, alors votre sol est de texture limoneuse.
- 3) Si vous parvenez à former une boule et que celle-ci reste souple et ne se brise pas lors que vous la manipulez, alors votre sol est de texture argileuse. **Voir l'arbre de décision pour déterminer le % d'argile**
- 4) Si vous ne parvenez pas à former de boule, alors votre sol est de texture sableuse.



Figure 3: Extrait du Pôle Chêne – Connaitre la texture de mon sol – méthode du boudin



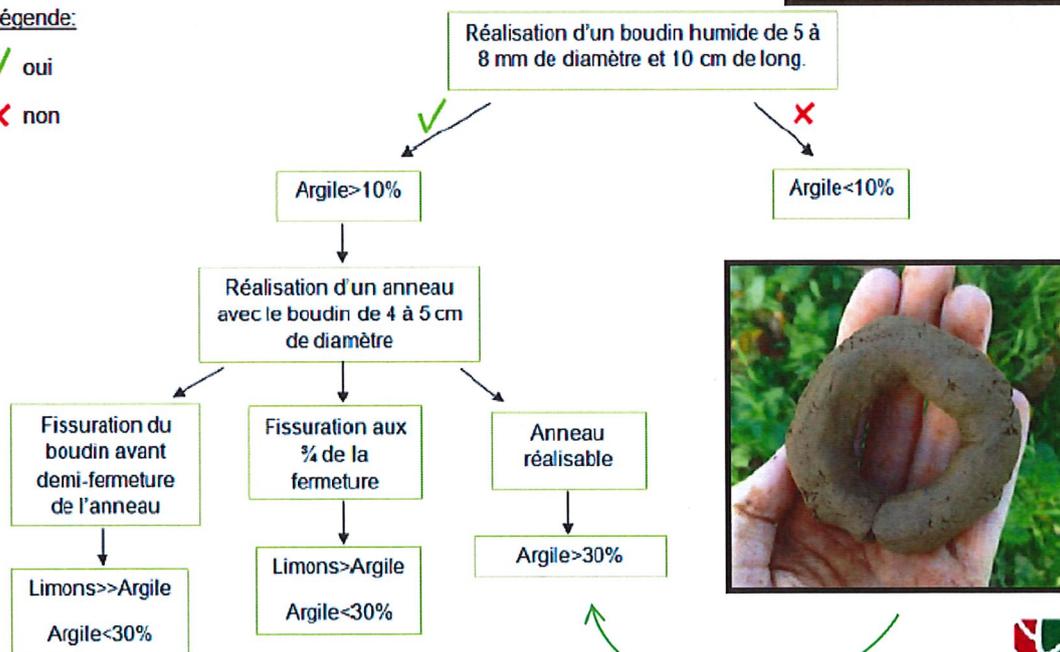
#### Arbre de décision pour le test du boudin

(Peigné et al. 2016)

Légende:

✓ oui

✗ non



Qui peut être complétée avec la méthode du bocal, plus précise, qui renseigne le % de sable/limon/argile (Figure 4) :

- 1 Prenez un bocal transparent type conserve. Celui-ci doit posséder des bords lisses et un système de fermeture. Plus il est étroit et haut, meilleure sera l'interprétation.
- 2 Remplissez-le à moitié de terre que vous aurez prélevée à 10 cm de profondeur.
- 3 Remplir d'eau jusqu'en haut en prenant soin de laisser un peu d'air. Bien refermer votre bocal.
- 4 Remuer fortement pendant 3 min.  
Laisser reposer pendant 30 min.  
Remuer de nouveau fortement pendant 3 min.
- 5 Laisser reposer pendant au moins 24 h afin que les particules d'argiles (les plus fines) puissent se déposer. Cela peut prendre plusieurs jours



Prenez soin d'attraper le bocal très doucement, sinon l'argile va de nouveau se dissoudre dans l'eau. En surface, les particules qui flottent sont les matières organiques. Les particules les plus grosses sont toujours au fond du bocal, ce sont les sables. À l'étage du dessus, vous trouverez les limons. Enfin, la dernière strate contient l'argile présente dans votre sol.

La seule difficulté de ce test consiste à repérer au mieux le changement de strates . Faites de votre mieux en prenant votre temps. Lorsque vous avez repéré les strates, prenez une règle et faites une mesure totale des strates, puis de chacune d'entre elles.



Exemple du test du bocal

Figure 4 : Extrait du Pôle Chêne – Connaître la texture de mon sol – méthode du bocal

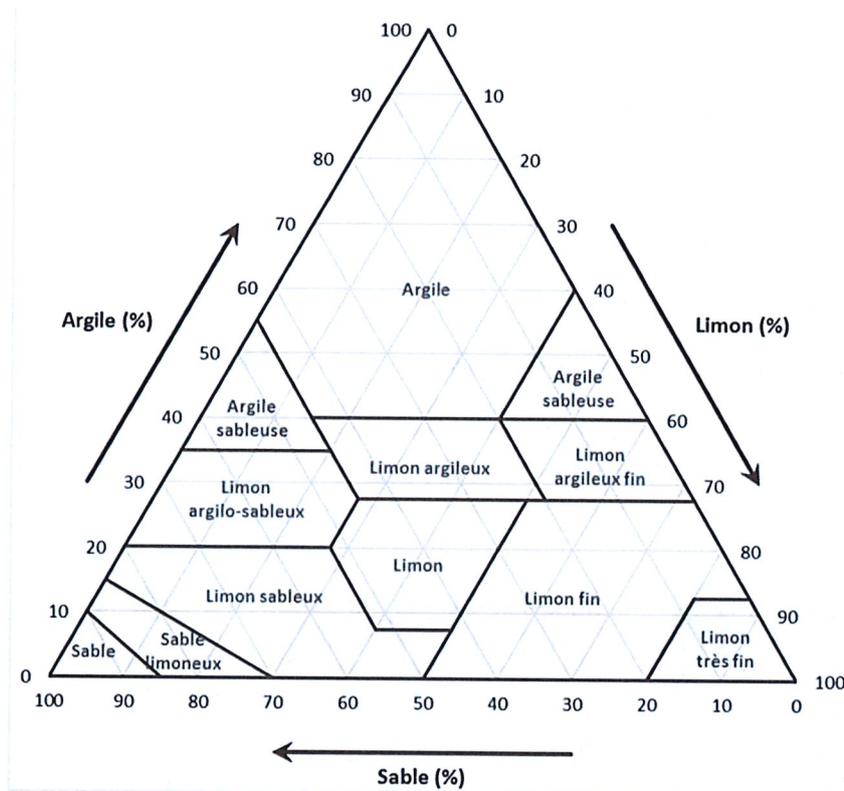


Figure 5 : Triangle des textures

Convertissez les strates obtenues en pourcentage avec le calcul suivant :

$$\frac{\text{hauteur strate (cm)} \times 100}{\text{hauteur totale de terre (cm)}} = \% \text{ texture}$$

Placer ensuite les % obtenues sur le triangle des texture (Figure 5) afin de déterminer la nature de votre sol.

Il est ainsi possible de regrouper les textures dans 4 catégories principales selon Duchaufour :

- **Texture sableuse** : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange anionique et cationique.
- **Texture limoneuse** : l'excès de limons et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques. Cette tendance est corrigée par une teneur suffisante en humus et en calcium.
- **Texture argileuse** : sol chimique riche mais à mauvaises propriétés physiques : milieu imperméable et mal aéré, formant un obstacle à la pénétration des racines, travail du sol difficile en raison de la forte plasticité (état humide) ou de la compacité (état sec). La structure peut être améliorée par une bonne humification.
- **Texture équilibrée** : elle correspond à l'optimum, dans la mesure où elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts. Un exemple de granulométrie favorable serait : 25% d'argile, 30 à 35% de limons et 40 à 45% de sables.

Tisot propose également une description visuelle des sols (Tableau 1) :

Tableau 1: Description visuel du type de sol

Type de sol		Taille (mm)	Description visuelle	
Bloc		> 60	Visible à l'œil nu	
Gravier	Grossier	20	Forme des grains : angulaire, arrondi, plat allongé Aspect : rugueux à poli	
	Moyen	6		
	Fin	2		
	Grossier	0,6	.Classement	Bien gradué,
Sable	Moyen	0,2		Mal gradué,...
	Fin	0,06		Mal gradué,...
Limon		0,002	Non visible à l'œil nu Crissant/poudreux au toucher Montre de la dilatance quand on l'écrase dans la main. Se désintègre dans l'eau rapidement.	
Argile			Toucher « savonneux » quand il est frotté avec de l'eau dans la main. Colle aux doigts et sèche lentement. Pas de dilatance.	
Sol organique			Contient une quantité notable de matières organiques.	
Tourbe			Essentiellement des restes végétaux. Sombre, brun ou noir. Très faible densité.	

L'expérience sur le terrain reste cependant la méthode la plus fiable pour déterminer la texture d'un sol au « toucher ».

### ➤ Réaction à l'HCL

L'effervescence à froid témoigne de la **présence de calcaire** dit « actif » dans la terre fine, sous forme de  $\text{CaCO}_3$ . Il convient de localiser le lieu de l'effervescence sur l'échantillon c'est-à-dire si elle se limite à la terre fine ou à certains volumes. (Ardouin 2012)

- **Effervescence généralisée** : la réaction se produit avec la terre fine dans toutes les parties de l'horizon ;
- **Effervescence localisée** : elle se localise à certains volumes de l'horizon comme les éléments grossiers. Le reste de la trame ne fait pas effervescence.

**NB** : On peut être sûr qu'un sol ne contient pas de calcaire actif par les végétaux qui y poussent. Le châtaigner par exemple est une essence calcifuge. Attention, la roche-mère de votre sol peut être calcaire sans que celui-ci ne contienne du calcaire actif.



# DÉTERMINER LE PH DE SON SOL

## ➤ Les différents tests :

Après avoir déterminé le type d'humus, une hypothèse de la valeur du pH peut déjà être avancée. Le pH étant la quantité d'ions acides  $H^+$  présent dans la solution du sol. Il est néanmoins nécessaire de conforter cette idée avec d'autres tests. Vous pouvez tester le pH de votre sol avec du bicarbonate de soude ou du vinaigre blanc (Figure 6) :

Le choix de l'emplacement du prélèvement dépend de l'hétérogénéité de la parcelle, si on constate une hétérogénéité physiologique forte au sein du peuplement (composition floristique, aspect de la végétation, variations topographiques importantes etc.), il faudra faire plusieurs prélèvements aux différents endroits. Dans tous les cas, plusieurs prélèvements sont conseillés afin de s'assurer de la fiabilité des résultats, et au moins un prélèvement doit être fait dans chaque horizon prospecté par les racines (si possible). Attention d'éviter les anciens chemins d'exploitation, les places à feu, les bords de route etc. (CRPF 2001)

**Le matériel**

- Bicarbonate de soude
- Vinaigre blanc
- Deux récipients
- De l'eau

**1** Prélevez un échantillon de terre dans le premier horizon que vous répartissez dans les deux récipients. L'échantillon ne doit pas être prélevé à la surface.

**2** Dans le premier récipient, versez du vinaigre blanc. Si le vinaigre réagit (Figure 5), c'est que votre sol est alcalin ( $pH > 7$ ).





*Figure 5 : Test d'un échantillon de terre au vinaigre blanc, réaction du vinaigre*

**3** Ajoutez de l'eau dans le deuxième récipient jusqu'à former une boue. Versez du bicarbonate de soude. Si celui-ci pétille, cela signifie que le sol est acide ( $pH < 7$ ). (Figure 4)





*Figure 4 : Test d'un échantillon de terre au bicarbonate de soude, réaction du bicarbonate de soude*

**4** Dans le cas où aucun des deux tests ne réagit, votre sol est probablement neutre ( $pH = 7$ ). Ce test est à répéter pour chaque horizon et chaque emplacement. Enfin, noter sur une carte les différentes valeurs que vous aurez obtenues avec leur géolocalisation. Attention, ne mélangez pas les valeurs entre horizons, ces informations sont précieuses pour localiser une potentielle anomalie.

Figure 6 : Extrait du Pôle Chêne – Connaître le pH de mon sol - méthode bicarbonate de soude et vinaigre blanc

Vous pouvez également déterminer le pH du sol avec de la chaux (Figure 7) :

Ce pH testeur est simple et rapide et coûte entre 5 et 10€. Il permet de déterminer le pH du sol et les éventuels besoins en chaux par un procédé colorimétrique, donnant un résultat très précis. Les mêmes conditions de prélèvements que pour les tests précédents sont à respecter.

- 1** Introduisez une pincée de terre (10mm) dans le tube à essai.


- 2** Versez de l'eau distillée jusqu'au repère 35.


- 3** Ajoutez un comprimé test pH, fermez le tube avec le bouchon et agitez jusqu'à dissolution complète du comprimé.



Il est préférable d'écraser la pastille avec un cuillère avant de la mettre dans le tube.
- 4** Laissez reposer ( $\approx$  3 minutes) la solution jusqu'à ce qu'elle ne soit plus trouble. La couleur obtenue est à comparer avec celles du recto du paquet afin de lire la valeur du pH.





Figure 7 : Extrait du Pôle Chêne – Connaître le pH de mon sol - méthode test à la chaux

De manière générale, le pH optimum pour des feuillus doit se situer entre 5,5 et 6 et pour des résineux, entre 4,5 et 5,5 (Lévy 1988).

➤ **Espèces végétales indicatrices du pH des chênaies et hêtraies (CRPFAquitaine 2005) :**

En plus des différents tests proposés ci-dessus, la flore est un très bon indicateur du pH de votre sol, ainsi que de sa composition, on parle de **plantes bioindicatrices**. Voici ici quelques exemples de plantes caractéristiques du pH, que vous pourrez reconnaître sur le terrain. De manière général, plus votre pH est acide, plus votre sol sera pauvre en éléments nutritifs.

❖ **Plantes des milieux très acides (hyperacidiphiles) :**

Ces plantes poussent sur des sols très pauvres en éléments nutritifs, au pH très bas. Les humus sont de type moder à mor.

Callune (1)	<i>Calluna vulgaris</i>
Canche (2)	<i>Deschampsia flexuosa</i>
Dicrane en balais (3)	<i>Dicranum scoparium</i>
Laïche à pilules (4)	<i>Carex pilulifera</i>
Leucobryum glauque (5)	<i>Leucobryum glaucum</i>
Molinie bleue (6)	<i>Molinia caerulea</i>
Myrtille (7)	<i>Vaccinium myrtillus*</i>



## ❖ Plantes des milieux acides (acidiphiles)

Ce groupe rassemble des plantes vivant sur des milieux un peu moins pauvres. L'humus est de type oligomull<sup>5</sup> à dysmoder<sup>6</sup>.

Asphodèle (1)	<i>Asphodelus albus</i>
Fougère aigle (2)	<i>Pteridium aquilinum</i>
Germandrée scorodoine (3)	<i>Teucrium scorodonia</i>
Houlque molle (4)	<i>Holcus mollis</i>
Luzule des champs (5)	<i>Luzula campestris</i>
Mélampyre des prés (6)	<i>Melampyrum pratens</i>
Millepertuis élégant (7)	<i>Hypericum pulchrum</i>
Néflier (8)	<i>Mespilus germanica</i>
Sabline des montagnes (9)	<i>Arenaria montana</i>



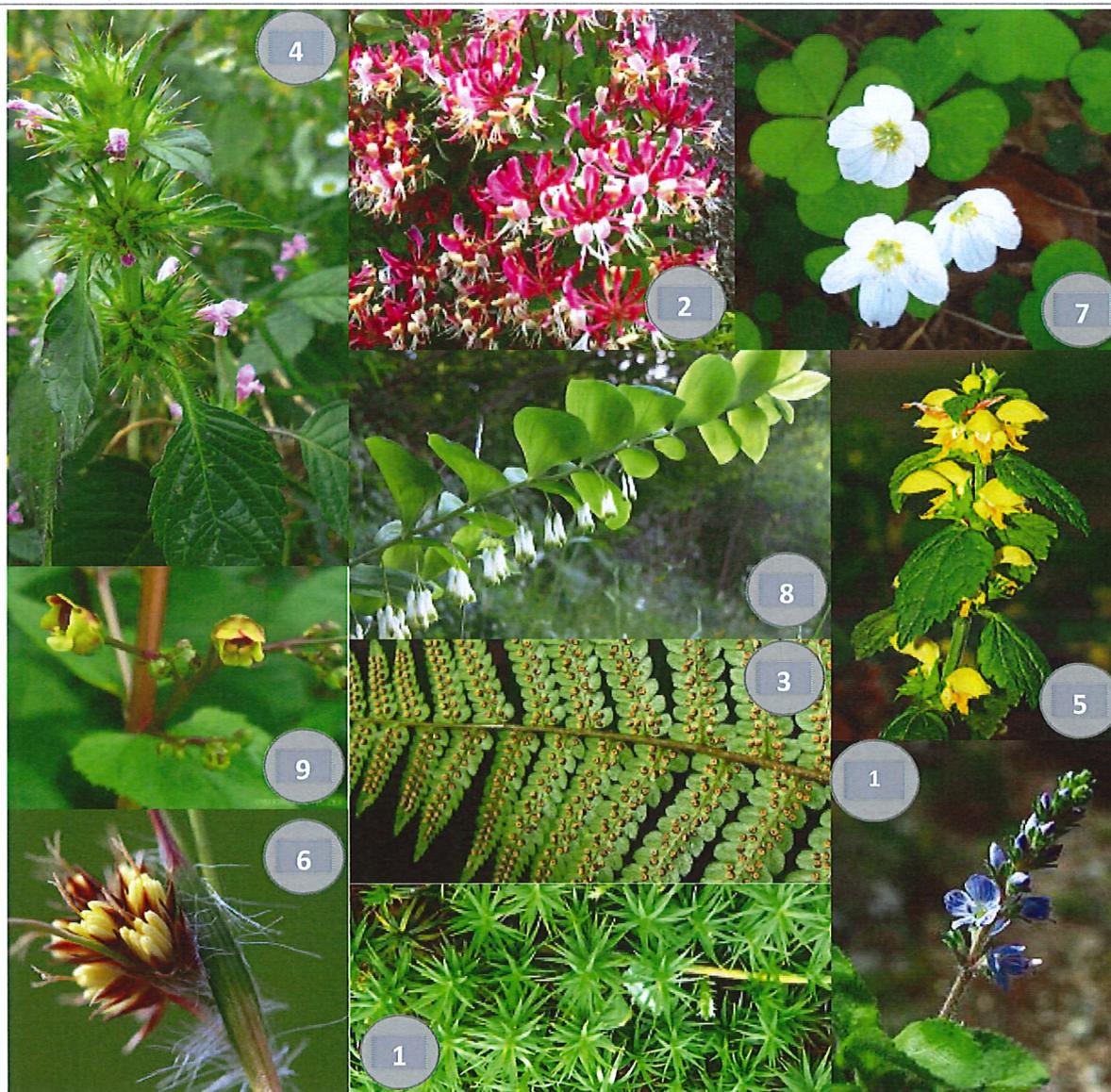
<sup>5</sup> Mull à fonctionnement biologique lent

<sup>6</sup> Dysmoder ou "mauvais moder" se rapprochent des humus de type mor

### ❖ Plantes des milieux peu acides (acidiclinales)

Ces plantes trouvent leur optimum sur des sols légèrement désaturés. Les humus correspondants sont de type mésomull<sup>7</sup>, voire oligomull<sup>8</sup>.

Atrichie ondulée (1)	<i>Atrichum undulatum</i>
Chèvrefeuille des bois (2)	<i>Lonicera periclymenum</i>
Fougère femelle (3)	<i>Athyrium filix femina</i>
Galéopsis tétrahit (4)	<i>Galeopsis tetrahit</i>
Lamier jaune (5)	<i>Lamiastrum galeobdolon</i>
Luzule de Forster (6)	<i>Luzula forsteri</i>
Oxalide petite oseille (7)	<i>Oxalis acetosella</i>
Sceau de Salomon multiflore (8)	<i>Polygonatum multiflorum</i>
Scrofulaire noueuse (9)	<i>Scrofularia nodosa</i>
Véronique officinale (10)	<i>Veronica officinalis</i>



<sup>7</sup> Mull à morphologie et vitesse de disparition des MO fraîches intermédiaires

<sup>8</sup> Mull à fonctionnement biologique lent

### ❖ Plantes des milieux neutres (neutrophiles)

Ces espèces sont présentes sur une large gamme de sols, mais leur abondance est maximale lorsque le pH est proche de la neutralité. Elles sont rencontrées sur des formes d'humus allant de l'eumull<sup>9</sup> au mésomull, voire à l'oligomull.

Aspérule odorante (1)	<i>Gallium odoratum</i> *
Circée de Paris (2)	<i>Circea lutetiana</i>
Dryoptéris écailleux (3)	<i>Dryopteris affinis</i>
Euphorbe faux amandier (4)	<i>Euphorbia amygdaloides</i>
Laîche des bois (5)	<i>Carex sylvatica</i>
Mélique uniflores (6)	<i>Melica uniflora</i>
Millet diffus (7)	<i>Milium effusum</i> *
Parisette (8)	<i>Paris quadrifolia</i>
Stellaire holostée (9)	<i>Stellaria holostea</i>
Véronique des montagnes (10)	<i>Veronica montana</i> *



<sup>9</sup> Mull typique à disparition rapide des MO fraîches

# FERTILITÉ PHYSIQUE

## Structure du sol, son état de porosité et sa résistance

Plusieurs outils sont à disposition pour aider le propriétaire forestier (ou agricole) à déterminer la structure de son sol. On pourra notamment se référer au « *Guide méthodologique du Profil Cultural* » de (Gautronneau et Manichon 1987) ou encore au « Test Bêche – Guide d'utilisation » fait par l'ISARA-Lyon (Peigné et al. 2016) plus condensé et plus facile d'utilisation mais moins précis.

Concernant la fertilité physique, elle englobe trois notions, **la consistance, la stabilité et la porosité**, qui dépendent largement de la texture de votre sol. La consistance et la stabilité peuvent se déterminer à l'aide d'un prélèvement fait avec une tarière, la porosité devra être observé soit à l'aide d'un profil pédologique, soit d'un test bêche.

### ➤ La consistance (facultatif)

**La consistance** est une notion qui traduit la cohésion et la résistance à la pression des unités structurales, elle varie en fonction de la granulométrie, du type de structure, de sa stabilité et le degré d'humidité du sol. Elle est d'une grande importance car elle conditionne l'enracinement et les possibilités de travail du sol (ni trop plastique ni trop cohérente).

### ➤ La stabilité

**La stabilité** de la structure est une mesure de la résistance des agrégats à la désagrégation, elle se ressent surtout par son impact sur l'infiltration de l'eau dans le sol et la facilité avec laquelle le sol est érodé (Unice 2008). Elle peut varier en fonction des circonstances (météo, travail du sol), et peut se dégrader. Les facteurs de dégradations principaux sont, la saison humide, les orages violents, disparition des ciments (travail du sol excessif), l'acidification et un changement d'humus, ainsi que le tassement par les machines. L'humus et le calcium sont les éléments favorables à la stabilisation des agrégats (Tisot s. d.). Cependant, la stabilité est déterminée majoritairement par la texture du sol ; **des textures avec trop peu d'argiles ont une faible cohésion et donc une faible stabilité structurale. Les sols les plus sensibles sont les sols riches en limons et/ou sables fins.** Une fourchette très approximative pour une teneur en argile *idéale* serait entre 15% et 40%. En-dessous de 15%, la stabilité structurale devient relativement faible et le sol facilement érodé ; au-delà de 40%, le sol a tendance à être lourd, avec une forte rétention de l'eau et une structure tendant à être massive (Unice 2008).

### ➤ La porosité ou compacité

**La porosité** caractérise le volume des vides en pourcentage de volume total. On y trouve la capacité en air, et la capacité en eau. Elle donne des éléments essentiels sur les propriétés physiques, assurant à la plante son alimentation hydrique et la respiration de ces racines. Il y a **la porosité structurale** qui est celle que l'on observe à l'œil nu, et la **porosité texturale** qui est la porosité des agrégats.

Un petit test très simple peut être réaliser sur le terrain, après avoir creusé votre sol. A l'aide d'un couteau, essayez de faire pénétrer la lame dans le sol fraîchement creusé, avec un mouvement de levier, à son état d'humidité instantané. Le sol est :

- **Meuble** : matériau non cohérent, le couteau pénètre sans effort jusqu'à la garde
- **Peu compact** : un léger effort est nécessaire pour enfoncer le couteau
- **Compact** : le couteau ne pénètre qu'incomplètement même avec un effort
- **Très compact** : le couteau s'enfonce de quelques millimètres seulement

Ces différentes données peuvent être confirmées par une observation fine du profil. Grace aux deux guides énoncés plus haut, on apprend qu'il existe deux grands types de structure, et que celles-ci peuvent se déterminer à l'œil nu :



Figure 15: Motte  $\Gamma$

**mottes  $\Gamma$  (gamma):** arrondie contenant une surface rugueuse/ grumeleuse avec une porosité importante visible à l'œil, contient de la terre fine agglomérée (Figure 15).



Figure 16: Motte  $\Delta$

**mottes  $\Delta$  (delta) :** surface lisse, plane et sans porosité visible à l'œil (Figure 16).

Figure 8 : Extrait du Test Bêche, détermination de la structure interne des mottes  $\Gamma$  et  $\Delta$

Les mottes de terre de type  $\Gamma$  (Figure 9) représentent la meilleure structure de sol, aéré, où la vie biologique est généralement abondante. La structure  $\Delta$ , représente un type de sol très compact, peu aéré, où la vie biologique a du mal à s'installer. Cependant, certains types d'organismes vivants, comme les lombrics, arrivent à creuser des galeries dans un sol de type  $\Delta$ , et à les restructurer petit à petit. Ces sols sont notés  $\Delta_0$  (ou  $\Delta_b$ ), et traduisent une structure compacte, avec quelques traces d'activité biologiques (Figure 9). **Cependant, un sol tassé mettra des années à se restructurer par lui-même.**

**mottes  $\Delta_b$ :** mêmes caractéristiques que  $\Delta$  mais avec quelques macropores d'origine biologique <sup>1</sup>. Le b représente l'activité biologique présente au sein des mottes delta (Figure 17). Les macropores et les éléments de bioturbation sont créés par l'activité des organismes du sol, et notamment des vers de terre (Figure 18).



Figure 17: Motte  $\Delta_b$



Figure 18: Macropores et signe de bioturbation

Figure 9 : Extrait du Test Bêche, détermination de la structure interne des mottes  $\Delta_0$  ou  $\Delta_b$

Pour prélever un bloc de terre et déterminer la structure de votre sol, deux solutions sont possibles ; **1)** passer par un [profil pédologique](#), méthode laborieuse mais très fiable, **2)** passer par [un test bêche](#), méthode plus facile mais moins fiable. Les deux méthodes ne seront pas détaillées ici, mais les liens sont donnés pour découvrir les guides<sup>10</sup>.

**Attention, on ne peut pas déterminer la structure d'un sol avec une tarière, celle-ci « écrasant » totalement les différents horizons lors du prélèvement.**

Toutes ces notions sont très importantes car elles affectent directement les racines des végétaux. En effet, le sol peut s'opposer de manière mécanique à la pénétration des racines, et peut provoquer leur asphyxie si l'oxygène vient à manquer (compaction ou engorgement).

La respiration des racines est optimale lorsque l'état structural du sol assure une forte capacité en air (et donc une forte porosité), **supérieur à 10%**. Si on a à faire à un sol tassé, à structure fine, saturé d'eau capillaire, le renouvellement d'oxygène ne peut pas avoir lieu et la respiration des racines est alors compromise. On peut également rajouter qu'en milieu mal aéré, la toxicité des ions échangeable  $Mn^{2+}$  et  $Fe^{2+}$  s'ajoute.

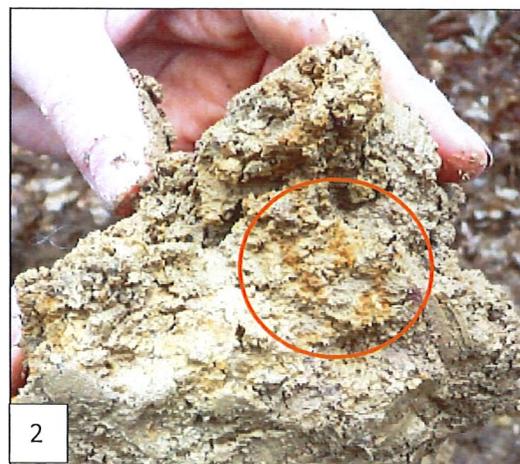
Les sols **les plus compactés sont des sols à texture limono-argileuse ou argileuse** (les sols sableux étant les moins soumis à la compaction), dans lesquels la porosité structurale a été détruite naturellement ou mécaniquement. Pour les sols forestiers il s'agit des pélosols qui sont les sols avec un pourcentage d'argile > 45%. (Duchaufour 2001)

Certaines essences sont plus ou moins sensible au tassement du sol. Le hêtre et l'épicéa supporte mal l'asphyxie, contrairement au chêne pédonculé qui semble mieux adapté que le chêne sessile. Les plus résistant sont ceux capable de capter l'oxygène par leur partie aérienne (l'aérenchyme) comme l'aune glutineux, le bouleau pubescent ou certains saules. De plus, certains arbres ont des racines pivotantes, qui aident à la restructuration des sols.



### ➤ Traces d'hydromorphies

Les traces d'hydromorphies sont dues à un engorgement permanent ou temporaire du sol. Elles se repèrent à leurs couleurs ; **1)** si un horizon ressort d'une couleur bleuâtre à grisâtre, plutôt homogène, c'est qu'il y a eu présence d'eau dans le sol de manière permanente, ce qui a réduit le fer sous sa forme  $Fe^{2+}$ . Cet horizon n'a jamais été aéré, les racines s'y asphyxient sauf si le végétal supporte les engorgements permanents ; **2)** Si un horizon ressort bicolor, marbré de couleur de rouille, on observe dans ce cas un engorgement temporaire, souvent durant l'hiver qui réduit le fer sous sa forme  $Fe^{2+}$ , et durant l'été l'oxyde sous la forme  $Fe^{3+}$ .



<sup>10</sup> Test – bêche : [http://orgprints.org/32099/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA\\_Lyon.pdf](http://orgprints.org/32099/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA_Lyon.pdf)

Guide du profil cultural : [http://www.supagro.fr/ress-pepites/PlantesdeCouverture/res/guide\\_manichon.pdf](http://www.supagro.fr/ress-pepites/PlantesdeCouverture/res/guide_manichon.pdf)

# FERTILITÉ BIOLOGIQUE

## Diversité biologique du sol

La plus grande partie de la biodiversité du sol se retrouve au niveau de l'humus. Définir le type d'humus de votre sol (voir § Déterminer le type d'humus de son sol) peut donc déjà vous donner un bon indice quant aux organismes qu'il renferme. On retrouvera plusieurs grands types d'organisme dans le sol ; les bactéries, les champignons, les actinomycètes, et la faune.

### ➤ Les bactéries

Les bactéries prolifèrent dans les milieux riches en azote et peu acides ; elles sont surtout abondantes autour des racines de certaines plantes (graminées, légumineuses...). Parmi les bactéries des sols, on distingue les bactéries aérobies (évolution en milieu oxygéné), participant essentiellement à des réactions d'oxydation de la matière organique et les bactéries anaérobies (évolution en milieu non oxygéné), les réduisant au cours de la fermentation. La plupart d'entre elles sont hétérotrophe, c'est-à-dire qu'elles se nourrissent de constituants organiques préexistant, et saprophyte, lorsque cette matière organique est morte. En opposition, les bactéries autotrophes sont capables de tirer leur énergie et leurs matériaux de construction essentiellement à partir de substances minérales. (Pierre Davoust 2017). **On considérera, de manière générale, qu'il est préférable d'avoir un sol aéré, car en milieu anaérobie la dénitrification (retour de l'azote dans l'atmosphère) est favorisée, et un appauvrissement des sols en azote est constaté.**



Figure 10 : Nodosités formés par des bactéries du sol

Certaines bactéries mettent en place une fixation symbiotique avec les racines des fabacées (légumineuses) créant ainsi de petites nodosités autour des racines, et permettant à la plante de fixer et réduire l'azote atmosphérique contenue dans le sol (Figure 10), laissant ainsi l'azote dissout dans le sol disponible pour les autres végétaux. De plus, à la mort de ces végétaux, l'azote fixé autour de leurs racines et restitué au sol, et peut être utilisé à nouveau. (BOURGEOIS et al. s. d.). Il est facile de les observer, mais attention à ne pas les confondre avec des champignons.

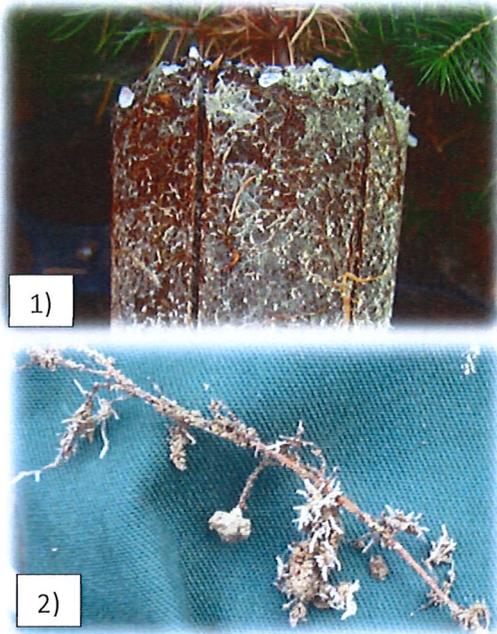
### ➤ Les actinomycètes



Figure 11 : Actinomycètes de type Frankia sur des racines d'aulne

Les actinomycètes sont un intermédiaire entre les bactéries et les champignons. Ils se caractérisent par des filaments mycéliens très ramifiés et non cloisonnés. Ces microorganismes ont généralement les exigences des bactéries aérobies (pH voisin de la neutralité, bonne oxygénation) et participent activement à l'humification en s'attaquant à la lignine. Certaines espèces forment également des nodosités avec les racines, à l'origine d'une fixation active d'azote atmosphérique, et de leur utilisation pour les reboisements de sols minéraux dépourvus d'humus (Duchaufour 2001). Les plus connues sont les actinomycètes de types *Frankia*, qui s'associent notamment avec les aulnes (Figure 11). Il est assez facile de les reconnaître si vous en avez.

## ➤ Les champignons :



Les champignons sont caractérisés par un mycélium pluricellulaire. Ils résistent mieux que les bactéries aux sols acides et à la sécheresse, et constituent la microflore quasi exclusive de certains humus de type *mor* secs et acides (Duchaufour 2001). Ils sont toujours hétérotrophes et aérobies, leur prolifération dépend donc directement de la richesse des sols en matière organiques, ainsi que de la structure du sol qui doit être bien aéré. Certains champignons sont associés aux racines des arbres, formant des mycorhizes à vie symbiotique, qui facilitent la croissance et la nutrition des arbres en question (Figure 12). Il existe deux types de mycorhizes ; les mycorhizes arbusculaires, qui pénètrent à l'intérieur des cellules des racines ; et les ectomycorhizes qui forment des manchons mycéliens autour des racines. Ces derniers seront les plus courants pour les arbres forestiers (Duchaufour 2001).

Figure 12 : 1) Mycorhizes sur racines de conifères, 2) Mycorhizes dans un bois de charmes

## ➤ La faune du sol

Enfin, la faune du sol joue un grand rôle dans la transformation de la M.O.F. et l'édification des structures. Elle est divisée selon sa taille (Tableau 2 ci-après) (Duchaufour 2001) :

- **Microfaune** : <math> < 100\mu\text{m}</math>, constitué essentiellement de protozoaires et de nématodes ; abondant dans les milieux très humides.
  - **Mésafaune** : de moder et *mor*) et à l'origine des boulettes fécales de l'horizon  $A_0$  (voir § Déterminer le type d'humus de son sol).
  - **Macrofaune** : taille supérieure à   - o **Les lombrics épigés** de petite taille colonisent les milieux à large amplitude de pH, caractérisent les *mull* acides, et certains types de *morder*. Provoque la division des litière (horizon L) mais ne les incorporent pas aux horizons minéraux. Ils creusent des galeries essentiellement horizontales.
  - o **Les lombrics endogés** (Figure 13) se développent à  $\text{pH} > 4,5$ , se rencontrent aussi bien dans les *mull* acides que les *mull* mésotrophes<sup>11</sup> et ne colonisent que les premiers centimètres de l'horizon  $A_0$ .
  - o **Les lombrics anéciques** de grande taille, très sensible à l'acidité, ne s'observent que dans les *mull* eutrophe et mésotrophe à  $\text{pH} > 5$ . Ils creusent des galeries verticales profondes au sein des horizons minéraux, et brassent ainsi les différents éléments, M.O.F. et éléments nutritifs.
- **Mégafaune** : désigne l'ensemble des espèces animales de grande taille ayant une partie du cycle de leur vie dans le sol. On retrouvera par exemple les taupes, les amphibiens et les reptiles.

La macrofaune, en plus de décomposer et d'aider à la minéralisation de la M.O.F., assure également la maintien d'une bonne porosité, et peut, à long terme, aider à restructurer des sols tassés. (Figure 14)

L'observation de la biodiversité de votre sol donne donc des indices précieux sur sa fertilité, et peut expliquer certains types d'humus ou la faune est quasi inexistante (*mor*) et donc la minéralisation très lente.

<sup>11</sup> Un milieu mésotrophe est un milieu moyennement riche en nutriments. Il se situe entre les milieux oligotrophe (moins riche) et eutrophe (plus riche).



Figure 14 : Turricule de lombric, témoin d'une activité biologique du sol



Figure 13 : Lombric endogé, souvent dépigmenté ou rose pale

Ces quatre grands groupes (bactéries, actinomycètes, champignons et faune) sont témoins de la vie biologique de votre sol, en plus des racines qui colonisent les différents horizons (Figure 15). De la même manière que pour les organismes vivants cité ci-dessus, plus les racines prospectent le sol, meilleure est la structure de celui-ci, car tous ont du mal à traverser les horizons compacts. Si vous parvenez à identifier certains de ces témoins de la vie biologique, cela signifie que la minéralisation des éléments nutritifs doit être bonne (à coupler avec le type d'humus et le pH de votre sol). Si vous ne parvenez pas à observer de vie dans vos sols, il s'agit alors d'en trouver la raison, afin d'essayer de la corriger. Elle peut être dû à la structure de votre sol trop compact, au pH trop acide ou trop basique, ou encore au type de gestion sylvicole appliqué sur vos forêts. En effet une gestion intensive en monoculture aura des conséquences dévastatrices sur la fertilité de vos sols (*Voir § Erreur ! Source du renvoi introuvable.*)



Figure 15 : Décomposition d'une racine à 60cm de profondeur, témoin d'une vie biologique importante.

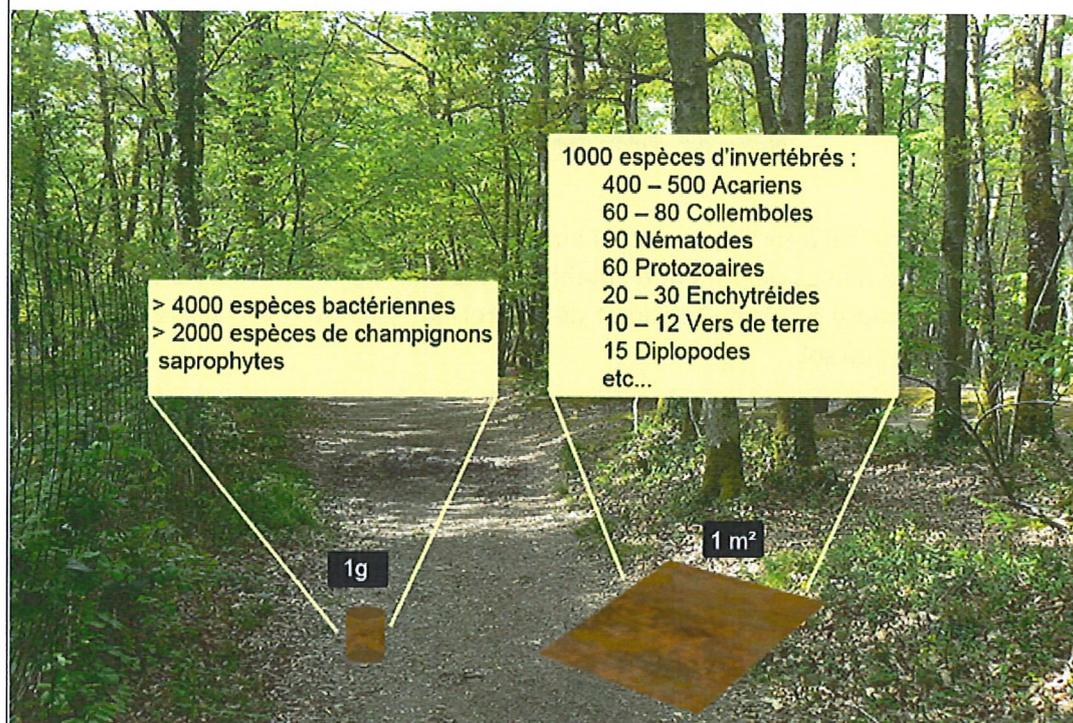
La Matière Organique de votre sol (morte ou vivante) en plus de nourrir vos arbres, permet d'altérer la roche mère, de former un complexe argile-humus qui retient d'autant plus les nutriments et l'eau, de conserver et d'améliorer la structure, afin qu'elle soit poreuse à l'air et à l'eau et de rentrer en symbiose avec vos arbres afin d'améliorer leur capacité à puiser les éléments du sol.

Tableau 2 : Caractères généraux des principaux représentants de la faune du sol (vertébrés exclus)

(BERTHELIN-TOUITAIN, 1979)

Caractères généraux	Allure schématique	Caractères spécifiques	Classe	Embranchement
<b>PROTOZOAIRES</b> (une seule cellule)		Amiboïde, flagellé ou cilié		AMIBES FLAGELLÉS CILÉS
<b>MÉTAZOAIRES</b> (plusieurs cellules)				
Absence de segments et d'appendices articulés.		Allure filiforme	<i>Nématodes</i>	NEMATHELMINTHES
Absence de segments et d'appendices articulés.		Allure massive, corps mou, sole de reptation.	<i>Gastéropodes</i>	MOLLUSQUES
Segments, pas d'appendices.		Soies fines sur segments.	<i>Oligochètes</i>	ANNELIDES
Segments, appendices articulés biramés, antennes.		Tête, thorax, abdomen.	<i>Crustacés</i>	} ARTHROPODES
Segments, appendices articulés uniramés.		Tête et tronc.	<i>Myriapodes</i>	
Segments, petit nombre d'appendices, pas d'antennes, 4 paires de pattes sur prosoma.		Prosoma = partie antérieure. Opisthosoma = partie postérieure.	<i>Arachnides</i>	
Segments, petit nombre d'appendices, antennes, 3 paires de pattes sur thorax.		Tête, thorax, abdomen	<i>Insectes</i>	

Figure 16 : Nombre d'espèces dans le sol en forêt tempérée d'après Torsvick et al. (1994), Hawksworth (2001), Schaefer et Schauer mann (1990)



# FERTILITÉ CHIMIQUE :

## Capacité du sol à fournir, retenir et recycler des éléments

Ce chapitre est destiné aux propriétaires forestiers qui souhaitent approfondir leurs analyses. Il permet de comprendre et de « savoir lire » une analyse de sol, en plus de la lecture des laboratoires.

La fertilité chimique d'un sol se vérifie essentiellement par une **analyse de sol** (ou un diagnostic foliaire). Des hypothèses ont pu être avancées jusqu'ici, mais seul une analyse faite en laboratoire pourra les confirmer. Pour comprendre le fonctionnement chimique des différentes données jusqu'ici extrapolées, il convient d'expliquer les bases du fonctionnement chimique du sol.

### ➤ Le complexe absorbant

Le sol est défini par son **complexe absorbant** (Figure 19), ensemble des composés humiques et argiles dotés de charges négatives, susceptible de retenir les cations qu'il échangera par la suite avec les plantes. L'état du complexe absorbant, et ses modifications éventuelles par échanges d'ions, offrent une importance considérable dans la mesure où ils régissent, par l'intermédiaire du pH, l'activité biologique, la structure et la fertilité minérale des sols. (Duchaufour 2001)

Il existe deux types cations : **1)** les cations générateurs d'acidité,  $H^+$  et  $AL^{3+}$  et **2)** les cations dits « basiques » tel que  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ .

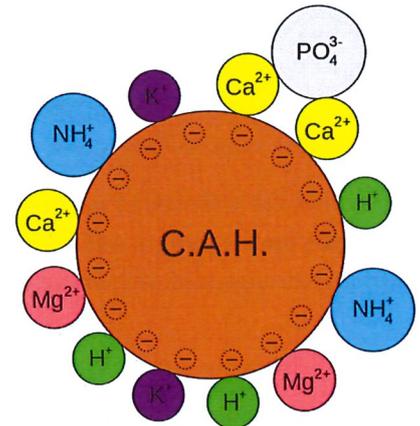


Figure 17 : Complexe absorbant ou complexe argilo-humique du sol

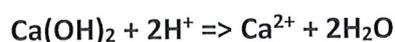
Plusieurs notions qui dépendent de ce complexe argilo-humique sont ainsi définies :

- **La capacité d'échange cationique (CEC)** : qui est la quantité maximale de cations qu'un sol peut absorber
- **La « Somme » des bases échangeable (S)** : C'est-à-dire la quantité de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  fixés sur le complexe à un moment donné. (CEC – S représente l'acidité potentielle)
- **Taux de saturation des « bases » (V)** :  $V = S/CEC \%$ , donne une indication sur la saturation du complexe par les cations dits « basiques ». Plus il est proche de 100%, mieux c'est.

### ➤ La capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC varie en fonction du pH, en effet plus le pH est neutralisé ( $pH = 7$ ), plus le sol est capable d'absorber de nouvelle quantité de « bases » ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ). **Donc à pH acide, un sol sera moins capable d'absorber ces « bases » et donc de les échanger par la suite avec les plantes, la décomposition de la matière organique en sera également diminuée par une baisse de l'activité biologique.**

En effet, à pH acide, le complexe absorbant est saturé par des cations d'acidité,  $H^+$  ou  $AL^{3+}$ , en ne laissant plus de place aux « bases » pour se fixer. C'est pour cela que sur un sol acide on effectue des chaulages, qui sont des apports d'anions couplé à des « bases » ( $Ca(OH)_2$ ,  $Mg(OH)_2$ ) qui grâce à leur charge négative réussissent à déloger les ions  $H^+$  présent sur le complexe pour laisser la place aux cations basiques ( $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ ) (Figure 18) (Unifa s. d.):

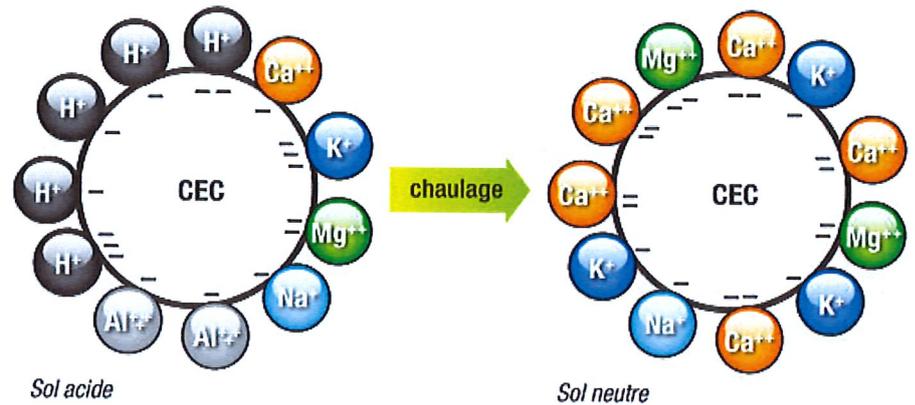


L'anion  $OH^-$ , grâce à sa charge négative, va capter un ion  $H^+$  pour créer une molécule d'eau  $H_2O$ , libérant ainsi le « base »  $Ca^{2+}$  qui ira se fixer sur le complexe argilo-humique.

Figure 18 : Action d'un chaulage sur le complexe absorbant

Ainsi, l'acidité du sol, dû à la présence d'ions  $H^+$  est neutralisé, et le pH augmente.

La force d'échange des cations n'est pas la même pour tous, ils peuvent se classer de la façon suivante :  $H^+ > Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ . Les ions présents sur le complexe absorbant sont donc délogeables par ceux qui leurs sont supérieurs, et ainsi plus facilement lessivables.  $Na^+$  et  $K^+$  sont donc facilement lessivables, contrairement à  $H^+$  et  $Al^{3+}$  qui viendront les déloger sur le complexe argilo-humique.



© UNIFA

Le complexe absorbant permet de mettre en réserve les éléments nutritifs pour les plantes, qui sans lui seraient perdues par lessivage, de libérer des éléments pour les racines et de régulariser la composition du sol. (MASSENET 2013). Les composés humiques (humus) ont également une CEC plus élevés que les argiles.

Tableau 3: Interprétation de la valeur de la CEC

VALEUR DE LA CEC EN méq/100 g	INTERPRETATION
CEC < 9	Petite CEC
$9 \leq CEC \leq 12$	CEC moyenne
$12 < CEC \leq 15$	CEC assez élevée
$15 < CEC \leq 25$	CEC élevée
CEC > 25	CEC très élevée

D'une manière très générale, on peut affirmer que la grande majorité des ions  $H^+$  du sol, responsable de l'acidification et de la saturation de la CEC, proviennent de l'activité biologique (respiration des racines, décomposition de la M.O etc.), une sol aura alors généralement tendance à s'acidifier naturellement (MASSENET 2013).

On considère comme **peu fertile** les sols dont les teneurs en éléments majeurs sont inférieures aux valeurs suivantes (Lévy 1988) :

- Horizons humifères ( $A_1$ ) : K : 0,6 ; Mg : 0,6 ; Ca : 1,0 ;  $P_2O_5$  : 0,10
- Horizons minéraux (B) : K : 0,12 ; Mg : 0,06 ; Ca : 0,3 ;  $P_2O_5$  : 0,06

Pour plus de précision sur les seuils, voir l'Annexe 4 : *détermination de la catégorie de sensibilité des sols à partir de leur composition chimique* (Augusto, Ranger, et Bonneau 2000).

### ➤ Le taux de saturation ( $V = S/CEC\%$ )

Un sol est dit saturé lorsque  $V = 100\%$ , il n'y a dans ces conditions aucun ions acide ( $H^+$  ;  $Al^{3+}$ ) sur le complexe argilo-humique. Dans la pratique, on considère qu'un sol est saturé lorsque  $V > 85-90\%$ . Sur un sol désaturé, les ions acides  $H^+$  et  $Al^{3+}$  sont majoritaire, et entraînent une acidification du sol, qui dans un premier temps diminue l'activité biologique, mais qui pour  $Al^{3+}$ , exerce une action supplémentaire directe toxique contre le développement racinaire. Au-dessus de pH5, l'augmentation brutale du taux de saturation traduit une diminution des ions acides, dont la

toxicité disparaît totalement vers pH5,5 (Duchaufour 2001). Il sera donc important de garder un pH supérieur à 5 dans ses sols. **On peut retenir de manière générale que pour les résineux, le taux de saturation doit être  $\geq$  à 10%, pour le chêne  $\geq$  à 20% et pour le frêne ou le peuplier  $\geq$  à 50%. (Lévy 1988)**

### ➤ Le pouvoir tampon du sol

Le sol a une capacité naturelle à s'opposer, plus ou moins efficacement, aux variations de pH, grâce à son **pouvoir tampon**. **Plus la CEC est grande, plus le sol a un pouvoir tampon élevé, et plus le taux de saturation est grand** (Tableau 3, (LANO s. d.)).

Les sols les plus à même de s'opposer aux variations de pH sont les sols contenant de la matière organique et du calcaire actif ( $\text{CaCO}_3$ ), qui libérera du calcium soluble (accentuer par une forte activité biologique). Viennent ensuite les sols qui contiennent d'importantes réserves en calcium et magnésium, sous forme échangeable et libérable (complexe saturé). **Les sols les mieux tamponnés sont donc les sols argilo-limoneux et les moins bien tamponnés sont les sols sableux**. Il faudra beaucoup plus de chaux pour élever le pH d'un sol sableux que celui d'un sol limoneux. (Duchaufour 2001)

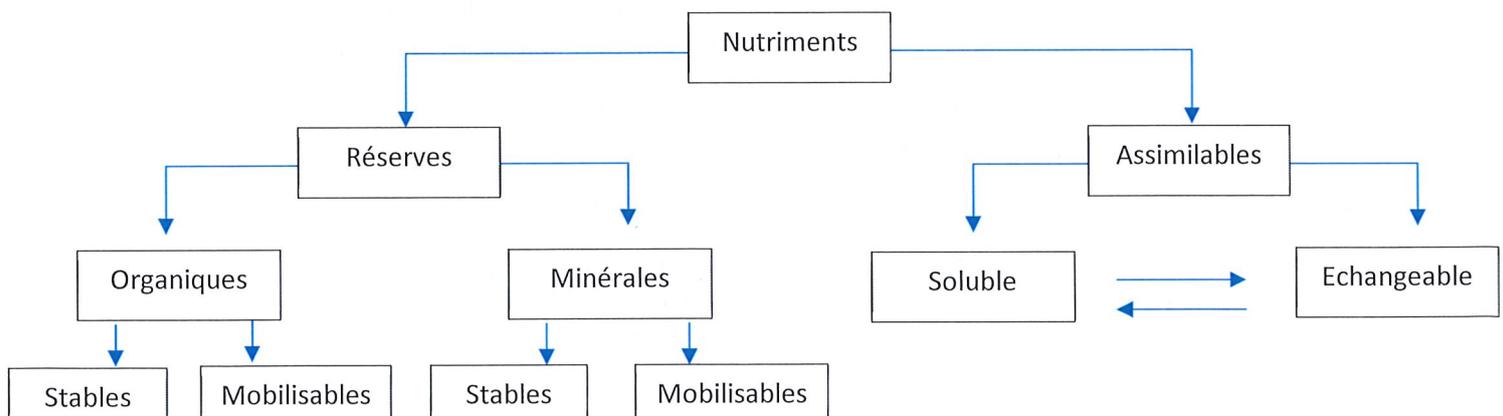
### ➤ Nutrition des plantes

On distingue deux types de nutriments :

- **Les nutriments de base** : absorbés en quantité élevée par la plante ; azote, phosphore, soufre, calcium, magnésium, potassium...
- **Les oligo-éléments** : absorbés à faible dose ; bore, fer, zinc, manganèse, cuivre...

Les nutriments sont dans le sol sous forme de réserve, forme non disponible, ou sous forme assimilable, directement disponible pour les plantes. On distinguera deux types de réserves, les réserves stables et les réserves mobilisables.

Les nutriments directement assimilables sont sous formes solubles ou échangeables, en équilibre entre les deux, et ainsi remplacés aussitôt lorsqu'ils sont absorbés par les racines.



**Les réserves de ses nutriments sont soit minérales soit organiques.** Les réserves minérales sont des réserves stables, pour les roches qui ont échappées à l'altération, et mobilisables pour celles subissant l'altération. Les réserves organiques sont formées soit le M.O.F. soit de matières organiques transformées (humus). La forme stable sera celle dont la minéralisation est très lente (lignine, tanin, plantes arborées etc.), et la forme mobilisable la matière organique minéralisée rapidement (plante herbacé, feuilles etc.).

Chaque nutriment est présent dans le sol soit sous forme organique, comme l'azote et le soufre, soit sous les deux formes, organique et minérale, comme le phosphore et les cations basiques. Pour les sols à végétation permanente, les réserves organiques sont généralement beaucoup plus grandes que pour les sols cultivés. Les nutriments de bases et les oligo-éléments sont concentrés, pour la forêt, essentiellement au sein de la litière et des horizons humifères. Ils se renouvèlent grâce à l'apport de M.O.F (comme pour l'azote) et par le cycle biogéochimique, qui est l'action de la matière organique sur la réserve minérale (libération des éléments nutritifs contenues dans le sol par action chimique de la matière organique sur la roche mère). Cependant ces nutriments de bases et oligo-éléments ne peuvent être assimilables par la plante que sous une certaine forme : cationique et anionique pour l'azote ( $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NO}_3^-$ ), anionique pour le phosphore, le soufre et certain oligo-éléments ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , B, Mo) et cationique pour le calcium, le magnésium et le potassium, ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ), et certains oligo-éléments ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ).

C'est ici que la **rhizosphère** entre en jeu. Elle désigne la **fine couche de sol qui entoure les racines absorbantes** et dont la composition est profondément modifiée ; **1)** au niveau du **pH**, en générale celui-ci s'abaisse en raison de l'émission de  $\text{H}^+$  par les racines ; **2)** au niveau de la **M.O.**, les racines rejettent des sucres (polysaccharides) qui permettent l'édification d'agrégats peu stable, des acides organiques et parfois même des hormones de croissance.

La rhizosphère modifie ainsi le cycle de l'azote et améliore la nutrition minérale, elle accélère la libération de  $\text{K}^+$  et de  $\text{Mg}^{2+}$ , le fer et les oligo-éléments sont rendus plus soluble et donc plus facile à absorber, et il peut y avoir une neutralisation possible de la toxicité due par  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Mn}^{2+}$ .

**Il est donc très important de garder une bonne teneur en M.O dans ses sols afin de faciliter les apports en éléments nutritifs, notamment l'azote qui est disponible seulement sous forme organique. D'où l'importance de nourrir son sol avec les rémanents, et de ne pas exporter la totalité de la végétation. Sachant également que la rhizosphère est très sensible au tassement, comme vue précédemment.**

Les principaux éléments nutritifs se retrouvent dans une analyse de sol, quant aux oligo-éléments, leurs déficits sont surtout mis en évidence par analyse foliaire.

### ➤ Réserves d'azote organique et nutrition azotée

Ces réserves sont présentes au niveau de la M.O.F. et libérées, plus ou moins rapidement, par l'activité minéralisatrice.

- **Réserve à minéralisation rapide** : on retrouve ici les engrais verts, les légumineuses, et toute les plantes pauvres en lignine, avec un rapport C/N entre (10 et 20) la minéralisation est souvent inférieure à 1 an.
- **Réserve à minéralisation progressive** : le temps de minéralisation est d'environ 25 ans, on classe ici le bois, et les plantes riches en lignine, avec un C/N > 20.
- **Réserve à minéralisation lente ou très lente** : le temps de minéralisation est supérieur à 100 ans.

Le rapport C/N, ou rapport carbone sur azote, est un indicateur qui permet de juger du degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire de son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol (Figure 19)

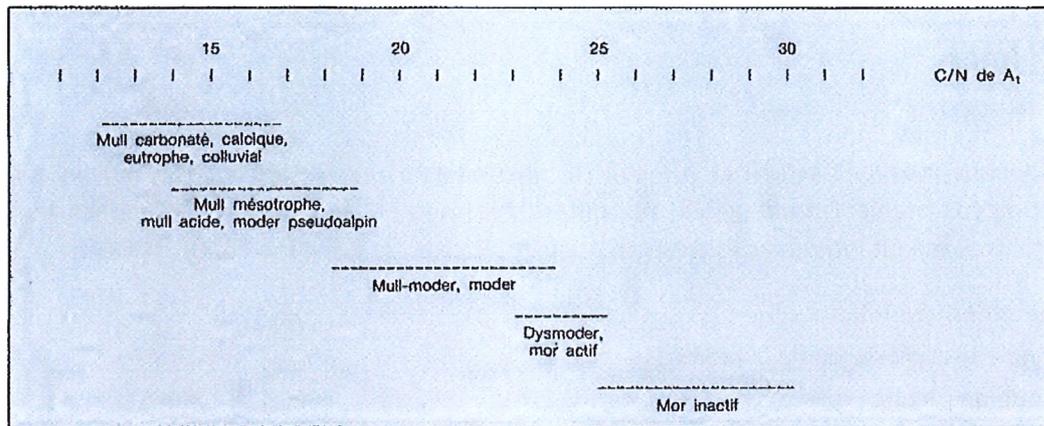


Figure 19 : Gamme de variation du rapport C/N de l'horizon A1 pour différents types d'humus

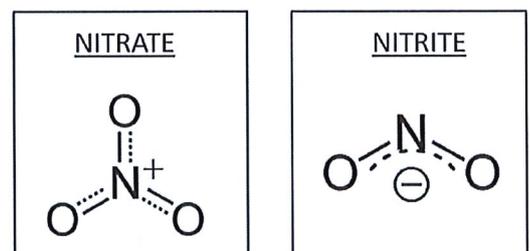
- $C/N < 8$  : Trop d'azote, la dégradation est trop rapide pour permettre aux plantes de prélever leurs nutriments
- $C/N < 15$  : Production d'azote, la vitesse de décomposition s'accroît ; elle est à son maximum pour un rapport  $C/N = 10$ , bonne activité biologique, nutrition azotée immédiate mais tendance à s'épuiser.
- $15 < C/N < 20$  : besoin en azote couvert pour permettre une bonne décomposition de la matière carbonée, faible activité biologique, le sol s'épuise moins.
- $C/N > 20$  : Pas assez d'azote pour permettre la décomposition du carbone (il y a compétition entre l'absorption par les plantes et la réorganisation de la matière organique par les microorganismes du sol, c'est le phénomène de "faim d'azote"). L'azote est alors prélevé dans les réserves du sol. La minéralisation est lente et ne restitue au sol qu'une faible quantité d'azote minéral. Activité biologique très faible.
- $C/N > 91$  : Substrat riche en lignine (bois, paille, BRF) : très peu d'azote, pas d'activité biologique, restitution des nutriments sur du très long terme. Le sol ne s'épuise pas.

Plus le C/N est élevé, plus la minéralisation sera lente, mais sur le long terme, celle-ci améliorera la structure du sol, et libérera des nutriments. Le type d'apport d'azote que l'on veut faire dépend donc des objectifs du sylviculteur.

On peut considérer que dans une forêt bien traitée et dans des conditions normales, l'absorption d'azote par les arbres équivaut sensiblement à la production annuelle d'azote minéral par l'ensemble des horizons humifères d'un humus de type *mull*, il y a un équilibre entre les entrées et les sorties.

Les essences forestières ont également des exigences quant au type d'humus et d'azote organique qu'il contient (Figure 20). Les essences neutrophiles (pH neutre) comme l'orme, le frêne ou l'érable champêtre préfèrent une nutrition azotée sous la forme nitrique ( $\text{NO}_2^-$ ) alors que les essences acidiphiles (pH < 7) comme le pin ou l'épicéa, résistent bien à l'acidification des sols, et préfèrent une nutrition azotée mixte (nitrate et nitrite) donnée par les *mull* acides et les *moder*. Quant aux feuillus sociaux<sup>12</sup>, comme le hêtre ou le chêne, ils possèdent une certaine plasticité et peuvent prospérer sur des types d'humus variés, allant des *mull* carbonatés aux *dysmoder*.

Figure 20 : Azote sous forme nitrique ou nitrate



<sup>12</sup> Les feuillus sociaux sont ceux qui supportent bien d'être entourés de leur semblable, sans compétition apparente.

# GESTION DURABLE DE LA FERTILITÉ DES SOLS FORESTIERS

Pour ne pas appauvrir davantage son sol forestier, il convient d'adapter les pratiques sylvicoles aux conditions de la station, déterminées préalablement grâce aux différentes méthodes énoncées. Les principales variables sur lesquelles le gestionnaire peut intervenir sont (selon Augusto, Ranger, et Bonneau 2000) :

- La longueur des révolutions
- La récolte de tout ou partie de la biomasse
- La méthode de récolte
- Le traitement des rémanents
- Le choix de(s) l'essence(s)

Le choix de l'essence a un impact notable sur le fonctionnement des sols, qui peut avoir des conséquences sur sa fertilité chimique. On peut distinguer trois groupes d'essences par rapport à leur capacité à mettre en danger à long terme, la fertilité chimique des forêts monospécifiques et denses :

- Les essences à risques **élevé** : Epicéa commun, Pin sylvestre et Mélèze d'Europe
- Les essences à risque **modéré** : le Sapin pectiné et le Douglas
- Les essences à risque **faible** : le Hêtre, Le Chêne sessile et le Chêne pédonculé

Il faut cependant croiser ces données avec le pouvoir tampon du sol, et ses réserves de fertilité (*Voir § Fertilité Chimique*)

Le choix de l'essence influence aussi directement sur la gestion sylvicole ; les essences résineuses interceptent plus de précipitations que les essences feuillues, ce qui conduit à une alimentation en eau moindre pour les premières. Les résineux conduisent également à une altération des minéraux 3 à 4 fois plus forte que les essences de feuillus. Le renouvellement du stock d'éléments immédiatement disponible est alors plus rapide, mais les réserves s'épuisent aussi plus vite. Les résineux auront aussi tendance à acidifier les sols plus rapidement que les feuillus.

Et inversement, la gestion sylvicole sur la fertilité du sol ; **l'exportation d'arbres non matures, c'est-à-dire avant ou aux environs de l'âge d'accroissement maximal, conduit à des pertes importantes d'éléments car leur bois est plus concentré que celui d'arbres plus vieux**. Il en est de même pour l'exportation des parties de l'arbre les plus concentrées, comme le tronc, les feuilles, les branchages. En effet, l'écorce du tronc contient à peu près autant d'éléments que le bois qu'elle recouvre (Lévy 1988). Exporter ces éléments sans les restituer au sol l'appauvrit donc grandement.

De manière générale, une gestion visant à limiter les pertes d'éléments par exportation de biomasse conduit à ne récolter que les arbres matures et à laisser sur place un maximum de rémanents.

Si la méthode de gestion est assez intensive, avec des objectifs de production élevés, il sera important de prévoir des mesures compensatoires à la perte de fertilité des sols (amendements, fertilisation etc.) mais seulement dans ce cas particulier. En effet, une fertilisation trop importante pourra être néfaste voir toxique, on préférera la fertilisation au moment de la plantation. Il faut aussi limiter un maximum le passage d'engins lourds, responsables de la destructuration des sols, et de leur tassement. Le gestionnaire pourra aussi choisir de mélanger, lors de la plantation, les essences cibles avec des essences moins néfastes, peu acidifiantes et altérantes (Lévy 1988). Attention également au raccourcissement des révolutions, qui se traduit par une augmentation des prélèvements au sol et des immobilisations, et potentiellement des exportations. Il apparaît même que les Taillis à Courte Rotation (TCR) consomment 3 à 5 fois plus d'éléments que les taillis classiques (Ranger et al. 2011). Enfin, les coupes à blanc sont également à éviter car elles exposent le sol nu et favorisent les pertes d'éléments nutritifs pour l'écosystème (Ranger et al. 2011).

## CONCLUSION

« Lorsque le turn-over de la matière organique est rapide (c'est-à-dire lorsque les litières disparaissent vite), les éléments minéraux présents dans les feuilles s'incorporent rapidement aux horizons de surface où ils s'accumulent sous forme assimilable, l'efficacité des cycles biogéochimiques est forte. Toute matière organique soluble qui percole des litières est insolubilisée dans l'horizon  $A_1$  ; il y a formation d'un complexe organo-minéral. L'altération est faible, l'absorption racinaire forte, et la productivité végétale importante. L'énergie fournie au sol sous forme de retombées biologiques « sert » donc surtout à **activer l'efficacité des cycles biogéochimiques et à assurer une forte productivité végétale** » (Toutain 1981)

La production de nos bois commence donc au niveau du sol. Avant de regarder en l'air ce qui ne va pas, il convient de regarder sous terre. Savoir si celle-ci est fertile, et surtout, savoir comment maintenir et/ou améliorer cette fertilité. Comprendre son sol c'est comprendre ses arbres, sachant qu'un sol pauvre ne pourra pas produire plus que ce qu'il ne contient. De plus, avec les avancés mécaniques et techniques, les forêts sont de plus en plus en danger, leur résilience décroît en fonction de leur santé, et donc de la santé de leur sol. Le gestionnaire forestier doit prendre conscience de l'importance de sa forêt, de son environnement, et de son écologie, qui sont gagent d'une bonne production, et surtout d'une expression maximale de la biodiversité du milieu.

Ce petit guide pour l'observation des sols forestiers références des méthodes faciles et rapides à mettre en place. Il se veut à la portée de tous, afin que chacun puisse comprendre ce qu'il se passe dans sa forêt. Ce guide n'est bien sûr pas complet et non exhaustif, et des choix ont dues être fait quant à son contenue, tant sur la forme que sur le fond. **Il ne remplace en aucun cas le travail des techniciens et ingénieurs forestiers**, qui seront les mieux placés pour répondre à vos interrogations, mais permet simplement de créer le dialogue entre le propriétaire, le gestionnaire et les exploitants.

Les avancés sur la recherche forestière étant encore loin de répondre à toutes nos questions, l'approche empirique par l'observation reste la plus fiable.

C. Vaskou

Récapitulatif de la méthode d'appréciation de la fertilité d'un sol forestier selon Lévy, 1988 :

- Examen du profil

Paramètres utiles à étudier : type et épaisseur de l'humus, profondeur du sol et, dans chaque horizon : texture, structure (dimension et netteté des unités), compaction et pénétrabilité (dépendent de la teneur en eau), traces d'hydromorphie (niveau et intensité des taches et concrétions ; il est utile de suivre la fluctuation des nappes, également), cailloux (nature, dimensions, proportion), calcaire de la terre fine, enracinement.

- Analyses de laboratoire (facultatif mais conseillé)

Elles comprennent principalement : des analyses physiques (texture, stabilité structurale) et des analyses chimiques (forme assimilable des différents éléments nutritifs, pH, S/CEC, matière organique, C/N)

# BIBLIOGRAPHIE

- Ardouin, Antoni. 2012. « Guide pratique pour la description des sols de France ». 2012. [http://www.forum-zones-humides.org/iso\\_album/guide\\_description\\_sol\\_v2.pdf](http://www.forum-zones-humides.org/iso_album/guide_description_sol_v2.pdf).
- Augusto, Laurent, Jacques Ranger, et M Bonneau. 2000. « INFLUENCE DES ESSENCES SUR LA FERTILITÉ CHIMIQUE DES SOLS. CONSÉQUENCES SUR LES CHOIX SYLVICOLES ». [http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/5384/507\\_518.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/5384/507_518.pdf?sequence=1).
- BOURGEOIS, Maeva, Elise COQUILLART, Morgane COURNARIE, et Claire FASSINO. s. d. « Sol - Rhizobium et nutrition azotée ». Consulté le 13 février 2018. [http://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/4\\_4\\_rhizobium.html](http://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/4_4_rhizobium.html).
- C. Hilliard et S. Reedyk. 2014. « Texture du sol et qualité de l'eau ». Fiche de renseignements. 2014. <http://www.agr.gc.ca/fra/science-et-innovation/pratiques-agricoles/sol-et-terre/le-sol-et-l-eau/texture-du-sol-et-qualite-de-l-eau/?id=1197483793077>.
- Charnet, François. 2018. *Les sols forestiers*.
- CNPF. 2011. *Guide pour identifier les stations forestières de Rhône-Alpes - Synthèse pour les Plaines et Collines Rhônalpines*.
- Colucci, Emma, Victoria Dunn, Marie Lemieux, Kate Soar, et Eleni Stefanopoulos. s. d. « Les horizons du sol. » Consulté le 28 mars 2018. [http://lithosphere-et-ress-energetiques.weebly.com/uploads/1/7/3/6/17364471/les\\_horizons\\_de\\_sol-corrige.pdf](http://lithosphere-et-ress-energetiques.weebly.com/uploads/1/7/3/6/17364471/les_horizons_de_sol-corrige.pdf).
- CRPFAquitaine. 2005. « Les espèces végétales indicatrices ». 2005. <http://www.foret-aquitaine.com/1florei.htm>.
- Duchaufour, Philippe. 2001. *Introduction à la science du sol*.
- « Fiches descriptives des sylvoécotés (SER) - INVENTAIRE FORESTIER ». s. d. Consulté le 27 juin 2018. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique211>.
- Gautronneau, Yvan, et Hubert Manichon. 1987. *Guide méthodique du profil cultural*. GEARA et CEREF, 1987. Mimeografado.
- Gis Sol. 2011. « La Capacité d'échange Cationique Des Horizons de Surface (0-30 Cm) Des Sols de France ». 2011. <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/la-capacite-dechange-cationique-des-horizons-de-surface-0-30-cm-des-sols-de-france-2330>.
- « INVENTAIRE FORESTIER NATIONAL ». 1995, 169.
- Jabiol, Bernard, Alain Brêthes, Jean Jacques Brun, Ponge Jean-François, François Toutain, Augusto Zanella, Michaël Aubert, et Fabrice Bureau. s. d. « Typologie des formes d'humus forestières (sous climats tempérés) », 35.
- Jabiol, Bernard, Alain Brêthes, J.-J. Brun, J.-F. Ponge, et François Toutain. 1994. « Une classification morphologique et fonctionnelle des formes d'humus. Propositions du Référentiel Pédologique 1992 ».
- Judy Chan. 2015. « What Do Mor, Moder, Mull and Multiple Factor Analysis Have in Common? | Judy Chan's Educational Development Portfolio ». 2015. <http://blogs.ubc.ca/jchan/2015/11/04/what-do-mor-moder-mull-and-multiple-factor-analysis-have-in-common/>.
- LANO. s. d. « Capacité d'échange Cationique / C.E.C. » Consulté le 16 février 2018. [http://www.lano.asso.fr/web/capacite\\_dechange\\_cationique.html](http://www.lano.asso.fr/web/capacite_dechange_cationique.html).
- Lévy, G. 1988. « Appréciation de la fertilité du sol ». *Revue Forestière Française, 1988, 5, fascicule thématique "Diagnosics en forêt"*.
- MASSENET, Jean-Yves. 2013. *Chimie du sol*. <http://jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO5.pdf>.
- Peigné, Joséphine, Jean-François Vian, Yvan Gotronneau, Lysiane Ruffe, Maxime Chignier-Riboulon, Perrine Achard, et Claire Vaskou. 2016. « Test Bêche. Guide d'utilisation ». [http://orgprints.org/31137/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA\\_Lyon.pdf](http://orgprints.org/31137/1/peigne-et-al-2016-GuideTestBeche-ISARA_Lyon.pdf).
- Pierre Davoust. 2017. « Pédoflore ou flore du sol ». 2017. <http://www.ecosociosystemes.fr/pedoflore.html>.
- « Pluviométrie en France ». 2009. 2009. [https://www.encyclo-ecolo.com/Pluio%3C%A9trie\\_en\\_France#Les\\_r.C3.A9gions\\_o.C3.B9\\_il\\_pleut\\_abondamment\\_:\\_de\\_900\\_.C3.A0\\_1.000\\_litres\\_annuelles\\_par\\_m.C2.B2](https://www.encyclo-ecolo.com/Pluio%3C%A9trie_en_France#Les_r.C3.A9gions_o.C3.B9_il_pleut_abondamment_:_de_900_.C3.A0_1.000_litres_annuelles_par_m.C2.B2).
- Poirier, Vincent. 2015. *Mull, moder et mor: étude des formes d'humus et de leur classification*. [https://www.researchgate.net/publication/283570453\\_Mull\\_moder\\_et\\_mor\\_etude\\_des\\_formes\\_d%27humus\\_et\\_de\\_leur\\_classification](https://www.researchgate.net/publication/283570453_Mull_moder_et_mor_etude_des_formes_d%27humus_et_de_leur_classification).

- Ranger, Jacques, Laurent Augusto, Alain Berthelot, Jean Bouchon, Emmanuel Cacot, Etienne Dambrine, André Gavaland, Jean-Paul Laclau, Arnaud Legout, et Manuel Nicolas. 2011. « Sylviculture et protection des sols ».
- Tisot, Jean Paul. s. d. « Propriétés Mécaniques et Physiques des Sols - Institut national polytechnique de Lorraine ». Consulté le 8 février 2018. [http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences\\_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap4/type.html](http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap4/type.html).
- Toutain, F. 1981. « Les humus forestiers; structures et modes de fonctionnement ».
- Unice. 2008. « La dégradation des sols dans le monde ». 2008. <http://unt.unice.fr/uoh/degsol/fertilite-physique.php>.
- Unifa. s. d. « La fertilité chimique ». Consulté le 9 février 2018. <http://fertilisation-edu.fr/le-sol/les-etats-de-la-fertilite/la-fertilite-chimique.html>.

## ANNEXES

Annexe 1 : Comparaison des principales caractéristiques écologiques des trois grandes familles d'humus (adapté de Ponge, 2003)

	<b>Mull</b>	<b>Moder</b>	<b>Mor</b>
<b>Écosystèmes</b>	Prairie, forêt de feuillus avec une riche végétation herbacée, zone arbustive méditerranéenne	Forêt de feuillus et de résineux avec une pauvre végétation herbacée	Forêt de résineux, landes tourbière de sphaigne, pré alpin
<b>Biodiversité</b>	Élevée	Moyenne	Faible
<b>Productivité</b>	Élevée	Moyenne	Faible
<b>Types de sol</b>	Brun	Gris-brun podzolique	Podzol
<b>Contenu phénolique de la litière</b>	Pauvre	Moyen	Élevé
<b>Taux d'humification</b>	Rapide	Lent	Très lent
<b>Types de matières organiques humifiées</b>	Agrégats organo-métalliques et complexes agrilo-humiques	Boulettes fécales entièrement organiques	Déchets de plantes lentement oxydés
<b>Sites d'échange</b>	Minéral	Organique (riche)	Organique (pauvre)
<b>« Weathering » minéral</b>	Élevé	Moyen	Faible
<b>Type de minéraux tampon</b>	Carbonates	silicates	Alumino-ferrique
<b>Impact du feu</b>	Faible (sauf dans les écosystèmes méditerranéens)	Médium	Faible
<b>Régénération des arbres</b>	Abondante (permanente)	Faible (processus cyclique)	Aucune (feu requis)
<b>Types mycorhiziens dominants</b>	VA-mycorhizes	Ectomycorhizes	Mycorhizes de types Ericoïde et Arbutoïde
<b>Microorganismes en association</b>	Zygomycètes	Basidiomycètes	Ascomycètes
<b>Formes d'azote</b>	Protéines, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Protéines, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Protéines
<b>Disponibilité des éléments nutritifs</b>	Directe (via les poils absorbants)	Indirecte (via le mycélium extramatriciel)	Pauvre
<b>Efficacité d'utilisation des éléments nutritifs</b>	Lente	Moyenne	Élevée
<b>Faune</b>	Mégafaune, macrofaune, mésofaune et microfaune	Macrofaune (pauvre), mésofaune (riche) et microfaune	Mésofaune (pauvre) et microfaune (pauvre)
<b>Groupe faunique dominant dans la biomasse</b>	Vers de terre	Enchytraéïdes	Aucun
<b>Groupe microbien dominant dans la biomasse</b>	Bactéries	Champignons	Aucun

Annexe 2 : (Toutain 1981) Classification des formes d'humus

<b>Humus émergés</b>	<b>Humus terrestres</b>	<b>Humus forestier</b>	<b>Mor</b>	Fibrimor Mésimor Humimor
			<b>Moder</b>	Dysmoder (Eu) moder Moder mulleux Moder calcique Moder carbonaté
			<b>Mull</b>	Mull dystrophe Mull oligotrophe Mull mésotrophe Mull eutrophe Mull calcique Mull carbonaté
		<b>Humus des végétations herbacées</b>	<b>Mor</b>	Mor granuleux Mor massif Mor feutré Mor feuilleté Mor rubané Mor mulleux
			<b>Mull-mor</b>	
			<b>Mull</b>	Mull grenu Mull massif Mull fin Mull feutré Mull feuilleté Mull lentiforme

## Annexe 3 : (Jabiol et al. 1994) Forme d'humus aérées forestières

Tableau IV Formes d'humus aérées forestières : principales références

Horizons O		Horizons A et transitions O-A			
		Complexes argilo-humiques abondants		Complexes argilo-humiques rares ou absents	
		discontinuité O//A		O-A passage progressif	discontinuité O/horiz. min.
		A biomacrostructuré	A d'insolubilisation	A de juxtaposition	pas de M.O. ou M.O. de diffusion
		MULL		MODER	MOR
OL ou OL et (OF)	(OLn) *	EUMULL			
	OLn (OLv) *	MESOMULL			
	OLn OLv (OF)	OLIGOMULL	Oligomull mycogène		
OL et OF **		DYSMULL		HÉMIMODER	
OL et OF et OH ou (OH)		AMPHIMULL (à étudier)		EUMODER (OH < 1 cm) DYSMODER (OH ≥ 1 cm)	MOR (à étudier)

NB : horizons entre parenthèses : horizons discontinus ; MO = matières organiques.

\* Horizons OLT facultatif au-dessus de l'horizon A.

\*\* Le terme « mull-moder » est à éviter dans la mesure où il privilégie le mot mull.

hémi : à demi

eu- : bien, bon

méso- : moyen

oligo- : peu

dys- : difficulté, mauvais état

amphi- : en double

eumull : mull « typique », à disparition rapide des matières organiques fraîches

mésomull : mull à morphologie et vitesse de disparition des MO fraîches intermédiaires

oligomull : mull à fonctionnement biologique lent

dysmull : mull à fonctionnement biologique très ralenti

amphimull : mull à double fonctionnement biologique

Annexe 4 : détermination de la catégorie de sensibilité des sols à partir de leur composition chimique (Augusto, Ranger, et Bonneau 2000)

**Tableau IV** Détermination de la catégorie de sensibilité des sols<sup>(a)</sup>  
à partir de leur composition chimique (Bonneau et Ranger, 1999)

Composition du sol	Variable	Catégorie de sol		
		très sensible	intermédiaire	peu sensible
Concentration par unité de masse	K (cmol <sub>c</sub> /kg) <sup>(b)</sup>	< 0,08	[0,08 ; 0,13]	> 0,13
	Ca (cmol <sub>c</sub> /kg) <sup>(b)</sup>	< 0,20	[0,20 ; 1,00]	> 1,00
	Mg (cmol <sub>c</sub> /kg) <sup>(b)</sup>	< 0,15	[0,15 ; 0,40]	> 0,40
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/kg) <sup>(c)</sup>	< 0,04	[0,04 ; 0,07]	> 0,07
	matière organique (%)	< 3	[3 ; 6]	> 6
	C/N	> 23	[23 ; 19]	< 19
Quantité par hectare <sup>(d)</sup>	K (kg/ha)	< 80	[80 ; 130]	> 130
	Ca (kg/ha)	< 100	[100 ; 520]	> 520
	Mg (kg/ha)	< 50	[50 ; 125]	> 125
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/ha) <sup>(c)</sup>	< 100	[100 ; 180]	> 180
	N (kg/ha)	< 1500	[1 500 ; 3 400]	> 3 400

(a) Analyse sur les 20 premiers centimètres du sol.

(b) Centimoles de charges par kg de sol (1 cmol de K<sup>+</sup> équivaut à 1 cmol<sub>c</sub>; 1 cmol de Ca<sup>2+</sup> ou Mg<sup>2+</sup> équivaut à 2 cmol<sub>c</sub>).

(c) Méthode Duchaufour et Bonneau (1959).

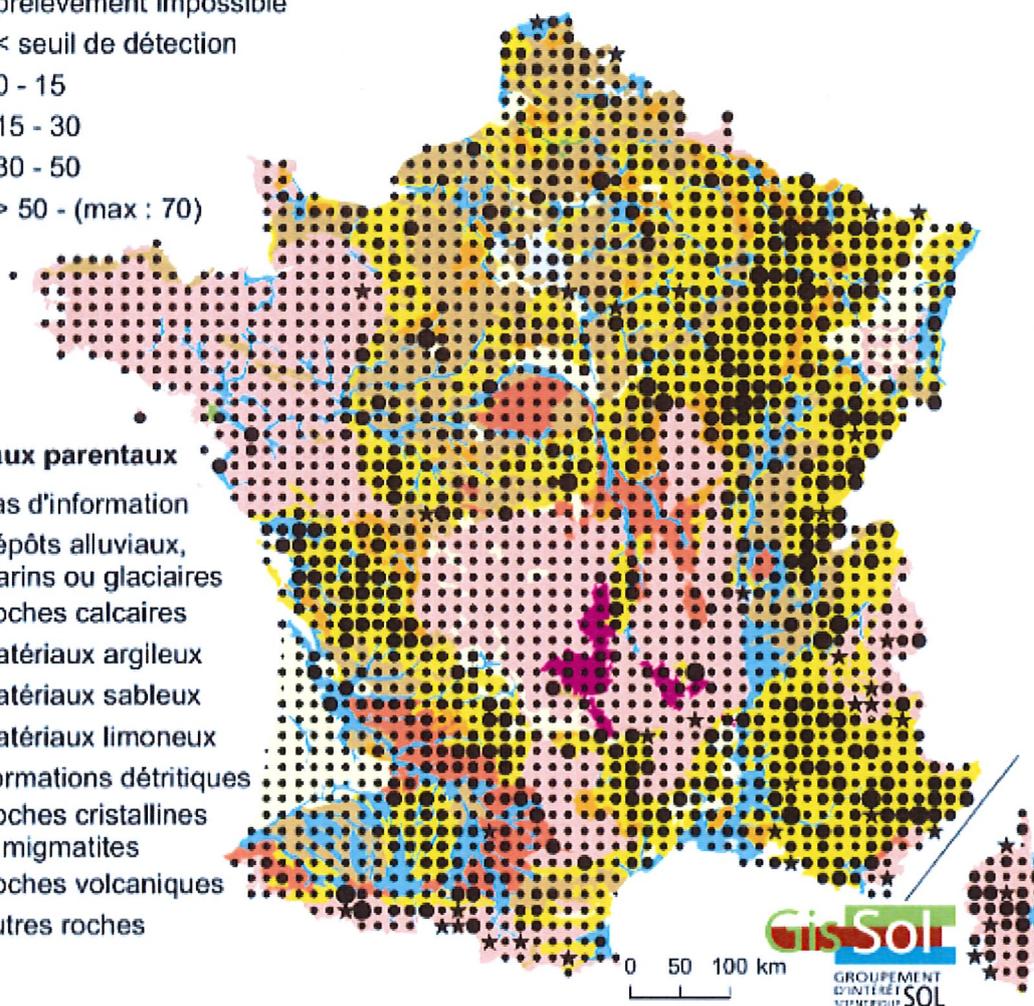
(d) Avec une densité apparente de 1,1.

### capacité d'échange cationique en $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$

- ★ prélèvement impossible
- < seuil de détection
- 0 - 15
- 15 - 30
- 30 - 50
- > 50 - (max : 70)

#### Matériaux parentaux

- Pas d'information
- Dépôts alluviaux, marins ou glaciaires
- Roches calcaires
- Matériaux argileux
- Matériaux sableux
- Matériaux limoneux
- Formations détritiques
- Roches cristallines et migmatites
- Roches volcaniques
- Autres roches



Annexe 5 : La CEC des horizons de surfaces (0-30cm) des sols de France (Gis Sol 2011)

1 cmole (+) / kg = 1 meq / 100 g