



● **Interbio** ●  
**FRANCHE-COMTÉ**

**ÉCOPHYTO**  
RÉDUIRE ET AMÉLIORER  
L'UTILISATION DES PHYTOS



**AGENCE FRANÇAISE  
POUR LA BIODIVERSITÉ**  
ÉTABLISSEMENT PUBLIC DE L'ÉTAT

# COMPRENDRE LES SOLS AGRICOLES ▲

«

*« Notre survie dépend d'une poignée de sol. Gérez-le avec prudence et il fournira notre nourriture, notre combustible et notre abri et nous entourera de beauté. Abusez-en et le sol s'effondrera et mourra, entraînant l'humanité avec lui. » (Vedas, , 1500 ans avant JC)*

|





# TABLE DES MATIERES

proposer des indicateurs fiables à faible coût .....	1
1, Les critères « sol » : définir le potentiel de base .....	2
Grille de notation du sol .....	2
Références de rendement en Franche comté.....	3
Définition et évaluation de chacun des indicateurs .....	4
Texture .....	4
Profondeur .....	5
Indice de différenciation texturale .....	6
Pierrosité .....	7
Hydromorphie .....	8
Changement climatique .....	10
2, Structure et pH : des éléments clés à observer sur le terrain .....	11
Structure.....	11
Définition & intérêt .....	11
Evaluation.....	11
pH .....	17
Définition & intérêt .....	17
Evaluation.....	17
La fertilité chimique, interprétation des indicateurs de l'analyse de sol .....	18
La teneur en éléments majeurs.....	18
Définition & intérêt .....	18
Carences .....	19
Evaluation.....	19
La teneur en oligo-éléments .....	20
Définition & intérêt .....	20
Carences .....	20
Evaluation.....	21
La teneur en matière organique.....	21
Définition & intérêt .....	21

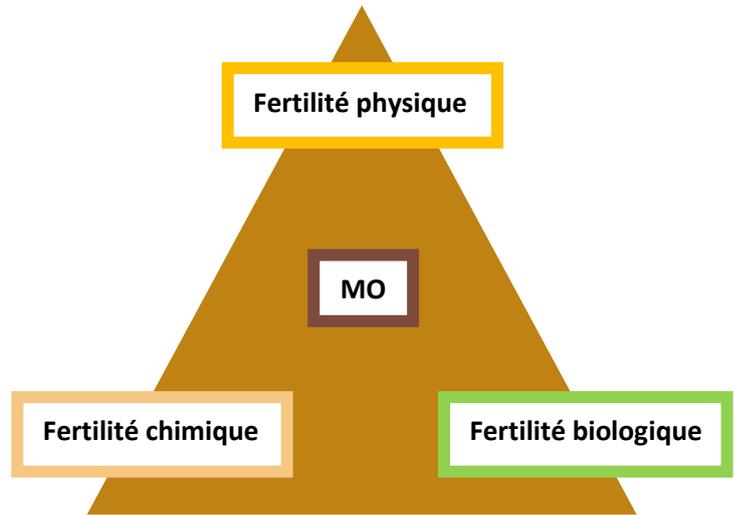
Evaluation.....	21
Le rapport C/N.....	22
Définition.....	22
Evaluation.....	22
La capacité d'échange cationique et le taux de saturation.....	23
Définition.....	23
La fertilité biologique.....	23
Définition.....	23
Evaluation.....	24
Fiche parcelle.....	25
Questions fréquentes.....	26
Comment améliorer la structure ?.....	26
Amendements Basiques, Comment agir ?.....	27
Bibliographie.....	30

## PROPOSER DES INDICATEURS FIABLES A FAIBLE COUT

Ce guide à pour but de mieux appréhender les sols agricoles, à travers des indicateurs simples à interpréter.

Afin de définir au mieux les indicateurs liés à la qualité du sol, nous sommes partis du schéma ci-contre qui illustre le fonctionnement du sol :

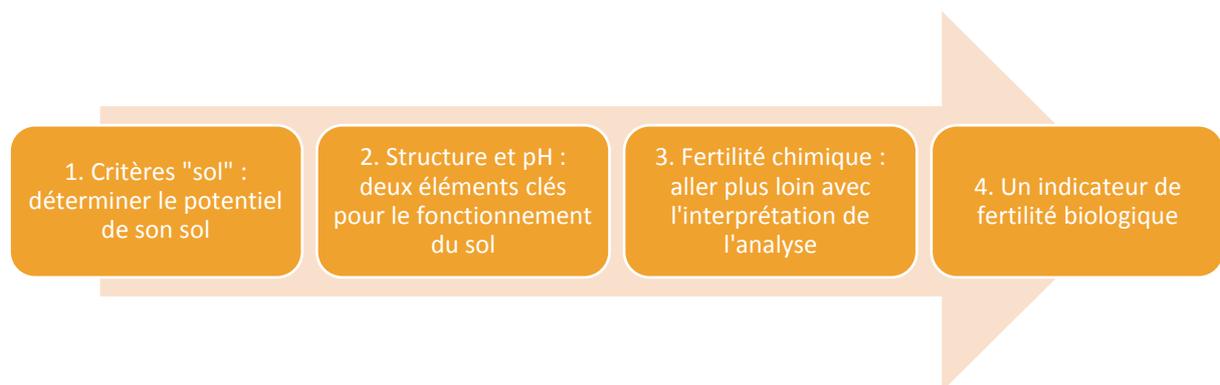
Les recherches bibliographiques ont permis de dégager de très nombreux indicateurs liés au sol, déterminés par une analyse de laboratoire ou par des observations sur le terrain.



Le travail a ensuite consisté à sélectionner les plus pertinents pour le contexte régional et l'objectif de ce travail : **proposer des indicateurs fiables, mesurables facilement, rapidement et à faible coût.**

Ce guide est constitué d'informations issues de recherches bibliographiques, d'échanges avec Christian Barnéoud (CRABFC), pédologue, et avec Joséphine Peigne (ISARA) ainsi que d'observations sur le terrain.

Ce document est constitué de 4 parties :



## 1, LES CRITERES « SOL » : DEFINIR LE POTENTIEL DE BASE

Ce sont ceux qui dépendent uniquement du sol, sur lesquels on n'a pas la main. Il faut « faire avec » ; ils sont inchangeables\*. Ici leur but est de définir le potentiel de base du sol en leur attribuant une note.

*\*Cas particulier de l'hydromorphie qui peut évoluer avec la mise en place de drainage.*

### Grille de notation du sol

5 indicateurs ont été retenus, tous évalués en 3 classes. Afin d'apporter une meilleure représentativité aux indicateurs qui peuvent être les plus problématiques, l'échelle de notation varie selon l'indicateur. Choix de la pondération : Une importance particulière a été apportée à deux indicateurs : l'hydromorphie et l'indice de différenciation texturale car ils ont une influence négative plus forte que les 3 autres indicateurs dans la réalité.

Dans tous les cas, plus le chiffre est faible plus l'indicateur est positif : la note de 1 est la meilleure possible.

A l'issue de l'évaluation de chacun des indicateurs, détaillée ci-après, on obtient une note permettant d'estimer le potentiel du sol observé.

*Pour atteindre ces potentiels de base il faut que les autres caractéristiques du sol (structure, pH etc.) détaillées ci-après, soient optimales.*

**Note de 5 à 10 : Bon potentiel :** le sol n'est pas limitant. On peut y envisager des rendements proches des maximums atteints dans la région en agriculture biologique (*voir figure 2 : résultats enauête de culture*)

**Note de 10 à 14 :** Potentiel moyen

**Note supérieure à 14 :** potentiel faible. La capacité du sol à produire est limitée. Sur ce type de potentiel il faut limiter les couts de production pour conserver une marge satisfaisante.



Exemple :

Figure 1 : exemple de grille de notation

Indicateur	Observation	Note attribuée	Note possible
Texture	Limons argileux	1	1, 2 ou 3
Profondeur	>60 cm	1	1, 2 ou 3
Indice de différenciation texturale	Moyen	3	1, 3 ou 6
Pierrosité	0%	1	1, 2 ou 3
Hydromorphie	Forte	6	1, 3 ou 6
		<b>Total : 12</b>	<b>Total : de 5 à 21</b>

La grille ci-dessus présente le cas d'un sol profond, avec une texture équilibrée idéale et une pierrosité nulle. Il est par contre impacté par une hydromorphie élevée et un indice de différenciation texturale moyen. Ainsi, la note globale est de 12, ce qui correspond à un potentiel moyen.

## Références de rendement en Franche comté

Source : enquête de cultures régionale, Interbio et CRA FC de 2011 à 2016

Figure 2 : rendements maximums et moyens en Franche-comté (en AB, exprimé en Quintaux/ha)

Culture	Rendement moyen	Rendement max	Culture	Rendement moyen	Rendement max
<b>Avoine hiver</b>	26.9	36	<b>Mélange céréales</b>	28.5	37
<b>Avoine printemps</b>	28.5	30	<b>Mélange céréales protéagineux</b>	35.2	75
<b>Blé</b>	31.8	62	<b>Orge Hiver</b>	21.1	35
<b>Colza</b>	15.9	20	<b>Orge Printemps</b>	37.7	40
<b>Épeautre</b>	29.6	43	<b>Pois Hiver</b>	35	35
<b>Féverole Hiver</b>	15.2	48	<b>Pois Printemps</b>	21.4	40
<b>Triticale</b>	30.8	47	<b>Seigle</b>	22.3	30
<b>Maïs</b>	49.9	120	<b>Soja</b>	22.8	33.6
<b>Maïs ensilage</b>	36	80	<b>Tournesol</b>	20	25

## Définition et évaluation de chacun des indicateurs

### TEXTURE

#### *Définition & Intérêt*

La texture d'un sol est la répartition granulométrique de ses constituants, c'est-à-dire la proportion des 3 composants : les argiles (particules inférieures à 2  $\mu\text{m}$ ), les limons (entre 2 et 50  $\mu\text{m}$ ) et les sables (taille des particules supérieure à 50  $\mu\text{m}$ ). Suite à cette répartition les sols sont classés en différentes classes de texture, en utilisant le triangle des textures.

En fonction de leur texture les sols présentent des comportements différents qui ont des conséquences sur la gestion de l'eau, du travail du sol ou encore de la fertilité :

- Les argiles sont généralement fertiles, stockent facilement l'eau et possèdent une bonne capacité d'auto structuration. Mais elles demandent une attention particulière pour le choix des conditions du travail du sol pour ne pas détériorer la structure (risque de lissage et de destruction des argiles) et sont donc difficiles à travailler. (*L'analyse granulométrique de permet pas de différencier les argiles « vraies » (à structure en feuillets) des argiles granulométriques*)
- Les limons sont naturellement riches et productifs mais ils sont très fragiles : peu résistants aux agressions climatiques et mécaniques, ils présentent un risque de battance, d'érosion et de compaction. Il faut veiller à ne pas faire de la terre trop fine lors du travail du sol.
- Les sols sableux sont peu sensibles à la compaction et se réchauffent rapidement. Ils sont par contre peu fertiles et très usants pour le matériel agricole. Il est important d'apporter de la matière organique stable. Ils sont aussi plus séchants car drainants.

*Quel que soit la structure, il est important de prendre en compte la matière organique : Un sol sableux bien pourvu en humus stocke plus d'eau qu'un sol argileux pauvre en matière organique (Thomas et Archambeaud)*

Il est important de connaître la texture du sol puisqu'elle influe à la fois sur les pratiques agricoles et sur la fertilité du sol. Il s'agit d'une mesure classique de laboratoire.

#### *Evaluation*

**On recherche idéalement une texture équilibrée, limitant les problèmes de compaction, de fertilité, de stockage de l'eau ou encore de travail du sol des textures plus pures.**

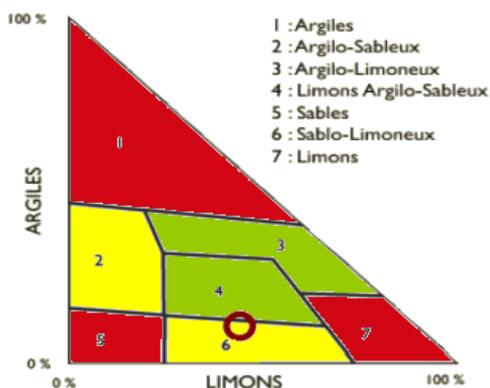


Figure 3 : Triangle de texture (SADEF)

Le test du boudin (page 7) permet d'évaluer approximativement la texture, en cas d'absence d'analyse.

	Note de 1	Note de 2	Note de 3
<b>Texture</b>	-Limons Argilo Sableux -Argilo Limoneux	-Argilo sableux -Sablo Limoneux	-Argiles -Limons -Sables

### *Impact de la pluviométrie et texture*

L'impact de la pluviométrie sur les sols dépend de leur texture : Un sol argileux retiendra plus d'eau qu'un sol sableux, qui sera lui plus sensible à des épisodes de sécheresse. Un sol limoneux sera plus facilement battant et moins résistant aux agressions climatiques et aux précipitations importantes.

## PROFONDEUR

### *Définition & Intérêt*

La profondeur du sol définit le volume de sol dans laquelle les racines peuvent se développer. Cet espace est également important pour le stockage de l'eau et la vie du sol. Plus le sol est profond, plus le développement racinaire est facilité. La réserve utile sera également plus importante.

C'est un indicateur clé de la qualité du sol puisqu'il impacte fortement le développement des cultures. Effectivement les racines des plantes cultivées, si elles ne sont pas limitées par la profondeur du sol, descendent profondément (environ 90cm pour les céréales d'hiver par exemple)

### *Evaluation*

La mesure de la profondeur peut se faire avec un pénétromètre\*, ou par l'observation d'un profil.

*\*Tige en métal permettant de mesurer la résistance du sol et sa profondeur*

	Note de 1	Note de 2	Note de 3
<b>Profondeur</b>	>60 cm	30 à 60 cm	< 30 cm

### *Impact de la pluviométrie et profondeur*

Plus un sol est profond plus sa capacité à stocker l'eau, et donc à résister aux épisodes de sécheresse sera importante.

## INDICE DE DIFFERENCIATION TEXTURALE

### Définition & Intérêt

Il s'agit d'un indice servant à mettre en évidence les contrastes granulométriques entre les horizons du sol. Cet indice est basé sur le taux d'argile de chaque horizon. (D. Baize) Un sol avec un indice de différenciation texturale (IDT) nul présentera un potentiel supérieur à un sol avec un IDT élevé. Un IDT élevé pénalisera l'eau et l'enracinement. Effectivement le fonctionnement du sol doit être vertical pour circulation de la faune du sol et de l'eau ainsi que pour l'enracinement.

### Evaluation

En plus de l'observation visuelle du profil, il est intéressant de réaliser le « test du boudin » sur les différents horizons pour évaluer leurs taux d'argile et rendre les mesures reproductibles.

On notera 3 classes d'indice de différenciation texturale :

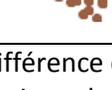
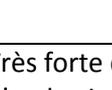
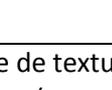
IDT nul		IDT moyen		IDT élevé	
Horizon x	Horizon y	Horizon x	Horizon y	Horizon x	Horizon y
					
					
					
Aucune différence de texture entre les horizons : même résultat sur chaque horizon avec le test du boudin		Différence de texture entre les horizons lors du test du boudin modérée : ex : Réalisation d'un boudin sur un horizon, d'un anneau sur le deuxième. Ou impossible de réaliser un boudin sur un horizon, possible sur le deuxième (mais pas un anneau)		Très forte différence de texture d'un horizon à l'autre. (ex : texture sablonneuse sur un horizon argileux ; Boudin impossible à réaliser dans les premier horizon et anneau possible ou presque avec le second horizon)	

Figure 4 : interprétation du test du boudin (A. Fleury)

Test	Résultat	Interprétation
Réalisation d'un boudin de terre humide	Possible	Argile >10%
	Impossible	Argile <10%
Réalisation d'un anneau avec le boudin de terre	Fissuration avant ½ fermeture de l'anneau	Limons > argile, argile <30%
	Fissuration au ¾ de la fermeture	Limons < argile, argile <30%
	Anneau réalisable	Argile > 30%

L'IDT impacte fortement le potentiel du sol, c'est pourquoi sa notation diffère de celles des deux premiers indicateurs.

	Note de 1	Note de 3	Note de 6
<b>Indice de différenciation texturale</b>	IDT nul	IDT moyen	IDT élevé

### Impact de la pluviométrie et IDT

Plus l'IDT est marqué plus le risque face aux précipitations importantes est élevé. Des précipitations fortes sur un temps court (ex : 60 mm ou plus cumulés) sont problématiques pour un sol avec un Indice de différenciation texturale élevé, qui ne sera pas en mesure de les absorber.

## PIERROSITE

### Définition & Intérêt

C'est le pourcentage d'éléments grossiers (>2mm) à la surface du sol. Un sol pierreux peut limiter le développement des cultures, rendre le travail du sol plus difficile, limiter la rétention d'eau ou encore user le matériel agricole. Les sols les plus avantageux sont ceux sur lesquels on ne trouve pas (ou peu) de cailloux en surface

### Evaluation

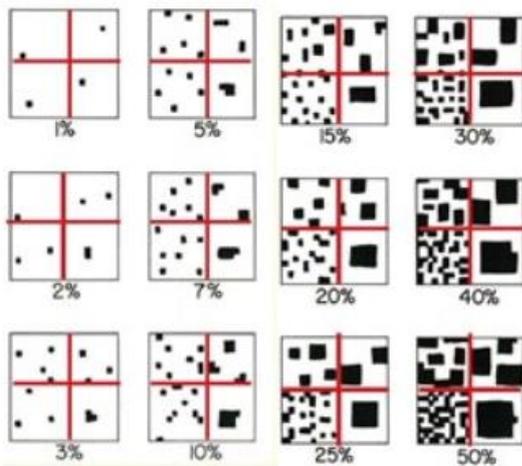


Figure 5: grille d'estimation de la pierrosité du sol (D. Hamonds)

L'estimation de la pierrosité de surface se fait visuellement, à l'aide de la grille ci-contre. On classe ensuite les sols en 3 classes : pierrosité inférieure à 10%, comprise entre et 10 et 20% ou supérieure à 20%.

	Note de 1	Note de 2	Note de 3
<b>Profondeur</b>	< 10 %	10 à 20%	>20%

### Impact de la pluviométrie et pierrosité

La pierrosité d'un sol améliore sa perméabilité et permet une meilleure pénétration de l'eau mais avec, en cas d'une forte présence superficielle de cailloux, une diminution de la surface utile d'humectation.

Le drainage est également augmenté ce qui peut être un atout dans les sols à risque de saturation en eau (base argileuse ou limoneuse) mais constitue une difficulté supplémentaire dans les sols grossiers à faible pouvoir de rétention d'eau. De même, cet effet sera souvent positif en saisons

humides (augmentation de la portance, drainage) mais négatif en périodes sèches (faible réserve hydrique, assèchement) (*agro-reporter*)

## HYDROMORPHIE

### Définition & Intérêt

Au sens strict et originel, l'hydromorphie est la manifestation morphologique de l'engorgement (ancien ou actuel) sous la forme de taches, de concentrations, de colorations ou de décolorations, résultant de la dynamique des deux éléments colorés en milieu alternativement réducteur (pauvre en oxygène) puis réoxydé (présence d'oxygène) : le fer et le manganèse. (D. Baize, 1995)

### Evaluation

Pour observer efficacement l'hydromorphie l'idéal est de réaliser un profil pédologique. Pour des raisons pratiques nous vous conseillons la méthode Pepone, à la fourche frontale, détaillée ci-après.

La notation d'hydromorphie répond à la classification du GEPPA qui répartit les sols en 6 classes selon leur seuil d'hydromorphie. Ces classes sont déterminées par la profondeur d'observations des traces d'hydromorphie (traces rouilles ou bleues).

Pour résumer la figure ci-dessous, plus les traces sont observées proches de la surface, plus l'hydromorphie est néfaste. Les couleurs de la figure correspondent aux traces d'hydromorphie observées : jaune/orange pour les traces rouille, bleu pour les traces bleues/grises.

*Attention ; les concrétions mangano-ferriques fréquemment observées ne sont pas à prendre en compte en tant qu'indicateur principal d'hydromorphie : elles peuvent être signe d'hydromorphie fossile et non actuelle*

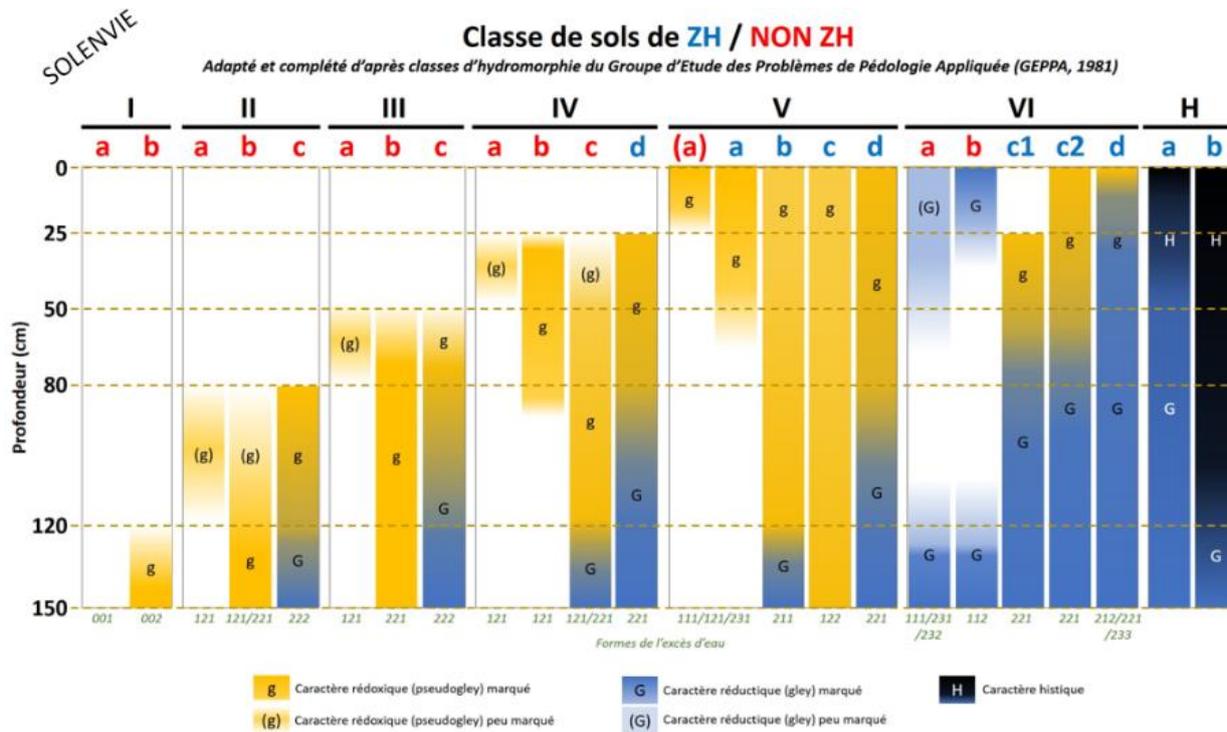


Figure 6 : classes d'hydromorphie (GEPPA)



Figure 7 : traces rouille (caractère rédoxique marqué) source : bassin versant du Meu. Figure 8 : traces bleues (caractère réductique) source E.Martin

	Note de 1	Note de 3	Note de 6
<b>Hydromorphie</b>	Classes I, II et III	Classes IV a, b et c	Classes IVd à VI

### *Impact de la pluviométrie et hydromorphie*

Un sol présentant ces caractéristiques d'hydromorphie entraîne l'accumulation d'eau dans la partie supérieure du sol, qui, lorsque cette zone est saturée, elle va ruisseler en surface. En cas de précipitations importantes le sol n'aura pas la capacité de drainage nécessaire pour évacuer cet excès d'eau, ce qui va restreindre le développement biologique des racines par asphyxie.

#### **Les causes de l'hydromorphie :**

« L'excès d'eau caractérisant les sols hydromorphes peut provenir :

- d'un défaut de perméabilité empêchant l'infiltration des précipitations dans le sol (ex : compaction)
- de la concentration dans le sol de flux d'eau d'origine extérieure tels qu'inondation, ruissellement, remontée de nappe souterraine, etc.

L'excès d'eau est plus ou moins durable dans l'année, il peut affecter une partie ou la totalité du profil. On peut rencontrer ces conditions en présence d'une nappe perchée, nappe souterraine, nappe libre, nappe captive, nappe temporaire (précipitations), etc.»

## **CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Nous avons vu que les sols avec un IDT élevé, les sols hydromorphes ou encore les sols peu drainants supportent mal les précipitations conséquentes.

D'après le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), le changement climatique et le réchauffement de l'atmosphère vont contribuer à l'augmentation de la fréquence des événements de précipitations extrêmes. Voici les conclusions du rapport du GIEC de 2013 :

- **La fréquence ou l'intensité des épisodes de fortes précipitations** a probablement augmenté, au moins en Amérique du Nord et en Europe.
- Il est probable que les influences anthropiques affectent le cycle mondial de l'eau depuis 1960 : elles ont contribué aux augmentations du contenu atmosphérique en vapeur d'eau [...] et à **l'intensification des épisodes de fortes précipitations sur les régions continentales.**
- **Les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents** sur les continents des moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides d'ici la fin de ce siècle, en lien avec l'augmentation de la température moyenne en surface.

Ce phénomène s'explique par le réchauffement atmosphérique : « Une atmosphère plus chaude peut potentiellement transporter 7 % d'humidité en plus par degré de réchauffement, conformément à la relation de Clausius-Clapeyron. »

Ainsi, les sols déjà sensibles aux précipitations fortes risquent de voir leurs potentiels chuter avec cette augmentation des épisodes de précipitations extrêmes et des crues.

## 2, STRUCTURE ET PH : DES ELEMENTS CLES A OBSERVER SUR LE TERRAIN

Si les 5 critères présentés précédemment dépendent uniquement de la nature du sol, ceux des chapitres 2 et 3 sont également liés à l'action de l'homme. Afin de pouvoir représenter graphiquement l'évaluation de ces critères, chacun se verra attribuer une note de 1 à 5 : 1 correspond à la meilleure note et 5 à la moins bonne.

Dans ce deuxième chapitre nous nous intéressons à deux éléments essentiels du fonctionnement du sol : la structure et le pH.

### Structure

#### DEFINITION & INTERET

La structure d'un sol désigne le mode d'assemblage, à un moment donné, des constituants d'un sol. La structure, contrairement à la texture qui ne change pas, est un état qui évolue dans le temps. Évaluer la structure de son sol permet de détecter un éventuel problème de compaction et de prendre les bonnes décisions en termes de travail du sol.

#### EVALUATION

Deux méthodes simples et rapides à mettre en œuvre seront présentées :

- Le test bêche (J. Peigne et al)
- La méthode à la fourche frontale, méthode Pepone

#### *Test bêche*



Ce test nécessite uniquement une bêche, une bâche, un mètre et un couteau et peut donc être mis en œuvre sans difficulté et rapidement de plus il n'est pas destructif.



Ce test a aussi ses limites : il ne permet pas d'observer au-delà de 25-30 cm de profondeur et dépend fortement des conditions climatiques (à réaliser sur un sol ni trop sec ni trop humide).

Le protocole complet est disponible ici : [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)

Ce test se fait en plusieurs étapes, et peut être reproduit dans différentes zones de la parcelle :

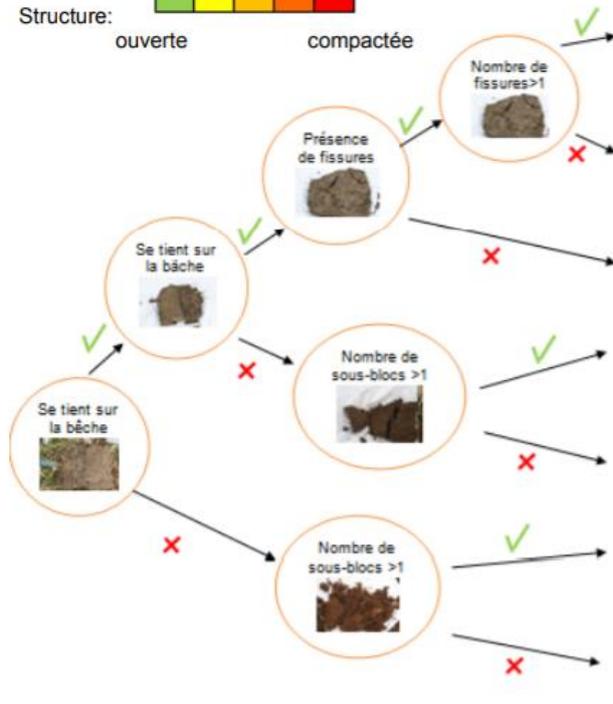
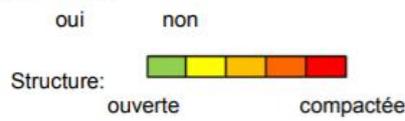
1. Extraction du bloc avec la bêche après avoir creusé une « pré tranchée » et sans avoir marché sur la zone interdite (zone qui correspond au bloc prélevé)
2. Observation du bloc sur la bêche : tenue du bloc, délimitation des différents horizons
3. Observation du bloc sur la bêche : Tenue, nombre de sous blocs, répartition des différents horizons, fissures
4. Observation des mottes pour chaque horizon (cf figure ci-dessous)



A l'issue de ces observations il est possible de déterminer l'intensité de tassement, classé de 1 à 5, grâce à l'arbre de décision ci-après.

Note de 5	Note de 4	Note de 3	Note de 2	Note de 1
Classe 5	Classe 4	Classe 3	Classe 2	Classe 1

**Légende:**



	Terre fine et/ou $\Gamma$ dominant	Dominance $\Delta b$ $\Gamma$ ou terre fine > $\Delta$	Dominance $\Delta b$ $\Gamma$ ou terre fine < $\Delta$	Dominance $\Delta$ $\Gamma$ ou terre fine > $\Delta b$	Dominance $\Delta$ $\Gamma$ ou terre fine < $\Delta b$
C2R	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 3	Classe 4
CR	Classe 2	Classe 3	Classe 3	Classe 4	Classe 4
C	Classe 2 Peu probable	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 5
C2R	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 3	Classe 4
CR	Classe 2	Classe 3	Classe 3	Classe 4	Classe 4
O	Classe 1	Classe 1	Classe 2	Classe 2 Peu probable	Classe 3 Peu probable
O/C	Classe 1	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4 Peu probable

Classe 1 : Structure du sol très ouverte, très poreuse, aucun tassement

Classe 2 : léger tassement

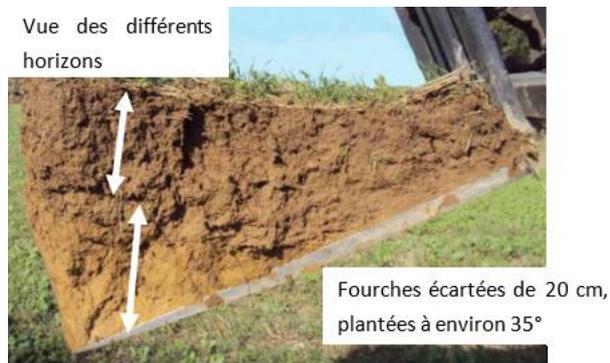
Classe 3 : tassement modéré, à surveiller

Classe 4 : Tassement à surveiller, action corrective à envisager

Classe 5 : Structure compactée, peu de porosité, tassement sévère, action corrective nécessaire.

### Méthode Pepone : observation à la fourche frontale

La méthode du profil à la fourche frontale consiste à prélever un bloc de sol avec les palettes d'un chargeur télescopique, ou d'un tracteur équipé d'un chargeur frontal, afin d'observer les horizons de travail du sol, la structure, l'enracinement, les traces d'activité biologique, et d'établir ainsi par observation un diagnostic de l'état structural du sol en un temps réduit. La méthode de prélèvement a été inventée par un agriculteur pour observer l'état de son sol à partir d'un profil, grâce à un procédé peu destructeur, simple, rapide et permettant une observation à hauteur des yeux. Cette méthode, intermédiaire entre le test rapide à la bêche et le profil cultural, a l'avantage d'être beaucoup plus simple à mettre en œuvre et moins destructive que le profil cultural. Elle permet également une meilleure observation de la structure et de l'enracinement au regard de la méthode à la bêche, en particulier dans les horizons profonds. Il suffit pour cela de planter dans le sols les fourches, préalablement écartées d'une vingtaine de centimètres, avec un angle d'environ 30 à 40°, puis de soulever la motte. (agro-transfert, Guide méthodologique du mini profil 3D)



#### Que faut-il observer ?

Une fois la motte sortie, voici les éléments à observer :

- L'état des limites entre horizons
- L'état de compaction
- La taille des agrégats et leur structure interne

#### Les limites entre horizons

<b>Les limites entre horizons</b>	Pas de discontinuité entre les horizons	Lissage visible (séparation entre 2 horizons), la porosité d'origine biologique n'est pas impactée	Lissage marqué, impactant l'enracinement et la faune du sol (racines* horizontales, peu ou pas de traces de vers de terre...)
			

Photos : agrotransfert, guide du mini profil 3D

### L'état de compaction

Observation générale de l'aspect du bloc prélevé.

L'état de compaction	<p>O : Ouvert. Forte porosité, nombreux agrégats de petite taille et arrondis (d'origine biologique), racines* et porosité sur l'ensemble du bloc <b>Pas de tassement</b></p> 	<p>B : en bloc. Présence de mottes de plus de 10 cm et de petits agrégats, peu de porosité à l'intérieur des mottes <b>Ancien tassement</b></p> 	<p>C : compact, continu. Bloc compact, pas d'agrégats visibles, très faible porosité et peu de racines* <b>Tassement important</b></p> 

Photos : agrotransfert, guide du mini profil 3D

### La taille des agrégats et leur structure interne

Observer l'état des mottes prélevées dans le bloc, sur différents horizons. Noter la proportion de chaque type de mottes.

Structure interne des agrégats	<p>Majorité de terre fine et mottes <math>\Gamma</math> : arrondies, poreuses, et contenant de la terre fine agglomérée</p> 	<p><b>Mottes <math>\Delta b</math></b> majoritaires : planes, anguleuses, avec présence de macroporosité d'origine biologique (racines, vers...)</p> 	<p><b>Mottes <math>\Delta</math></b> : planes, anguleuses, sans porosité visible à l'œil nu</p> 
	Taille des agrégats	Agrégats de petite taille, < 1 cm	Agrégats de 1 à 5 cm

**Appréciation globale et voies d'amélioration**

Note de 1	Note de 3	Note de 5
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etat Ouvert ou en bloc</li> <li>• Les mottes <math>\Delta</math> et <math>\Delta b</math> représentent moins d'un tiers du bloc</li> <li>• Absence de lissage marqué</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etat Ouvert ou en bloc</li> <li>• Mottes <math>\Delta b</math> majoritaires, porosité visible</li> <li>• Lissage modéré</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etat Continu</li> <li>• Zones tassées majoritaires (mottes <math>\Delta</math>)</li> <li>• Lissage marqué</li> </ul> 
<p><b>Pas de nécessité d'action mécanique</b></p>	<p><b>Intervention mécanique selon les cultures, surveillance régulière de la structure et identification des causes de tassement.</b></p>	<p><b>Intervention mécanique, travail en bonnes conditions et identification des causes de tassement. (voir page 26)</b></p>

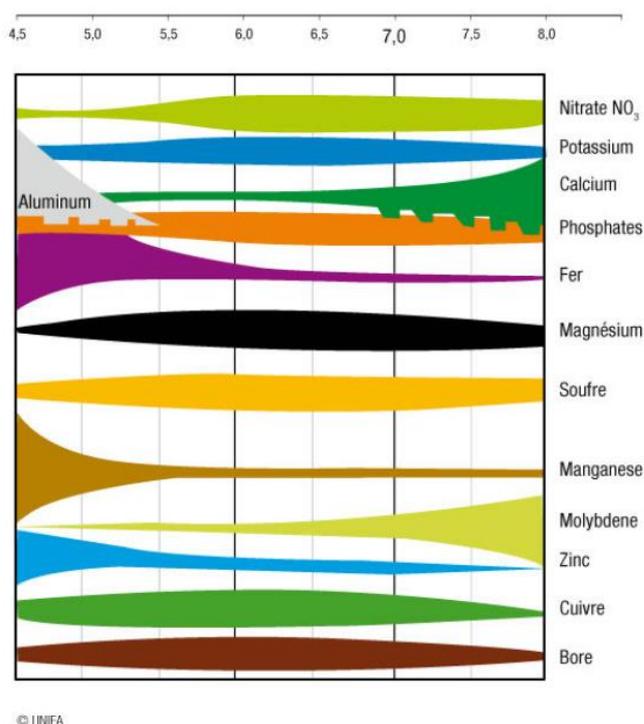
## pH

### DEFINITION & INTERET

le plus souvent les cultures ont besoin d'un pH proche de la neutralité. Un sol trop acide (L'ion H+ domine, laissant peu de place aux autres éléments nutritifs dans le CAH) à de nombreuses conséquences :

- Sur la fertilité chimique : Blocage des engrais phosphatés, diminution de l'efficacité des engrais, taux de saturation insuffisant, solubilisation d'éléments toxiques (Al<sup>3+</sup>), risque de carences en molybdène
- Sur la fertilité biologique : réduction de la faune utile du sol, activité bactérienne limitée, mauvaise dégradation des résidus de récolte, développement de parasites.
- Sur la fertilité physique : diminution de la stabilité structurale, diminution de la porosité, terre plus difficile à travailler. *(Interval, Guide cultural)*

Un sol basique peut impacter la disponibilité de certains éléments, comme le bore, le manganèse, le zinc ou le cuivre. A l'inverse un sol acide est problématique pour le molybdène. La figure ci-contre illustre la disponibilité des éléments dans le sol en fonction du pH.



**Le Test à l'acide : mesure du calcaire total**

*pendant l'observation du sol il est également intéressant de réaliser de test à l'acide : quelques gouttes d'acide chlorhydrique à 10% déposées sur une motte permettent d'estimer la teneur en Calcaire total. (Plus il y a effervescence, plus il y a de calcaire total)*

Figure 9 : Influence du pH sur la disponibilité des éléments. (Truorg 1948)

### EVALUATION

La mesure du pH peut se faire sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou être réalisée par le laboratoire. (Les valeurs ci-dessous correspondent au pH eau, et non au pH KCl) Les mesures sont à répéter plusieurs fois (utiliser la moyenne des valeurs obtenues)

Note de 1	Note de 2	Note de 3	Note de 4	Note de 5
de 6.5 à 7.2	D 6 à 6.5 et de 7.2 à 8	de 5.5 à 6	De 5.2 à 5.5 et >8	pH < 5.2

## LA FERTILITE CHIMIQUE, INTERPRETATION DES INDICATEURS DE L'ANALYSE DE SOL

Après avoir déterminé le potentiel du sol, mesuré le pH et observé la structure, l'analyse de sol réalisée en laboratoire permet d'évaluer la fertilité chimique du sol, de détecter d'éventuelles carences ou déséquilibres.

L'idéal serait de réaliser une analyse de sol tous les 5 ans pour optimiser la fertilisation et garantir la fertilité chimique de son sol.

En plus du pH et de la texture, évoqués précédemment, l'analyse présente les teneurs en matière organiques, éléments chimiques et Oligo-éléments.

### La teneur en éléments majeurs

#### DEFINITION & INTERET

Les éléments nutritifs, que ce soit les éléments majeurs (Phosphore, Potassium, Azote, Magnésium, Calcium) ou les Oligo-élément (Fer, Manganèse, Zinc, Cuivre, Bore, Molybdène...) sont nécessaires à la production végétale, au même titre que l'eau ou le climat. Si l'un de ces paramètres s'éloigne de l'optimum, il devient donc limitant, et tout le système productif est

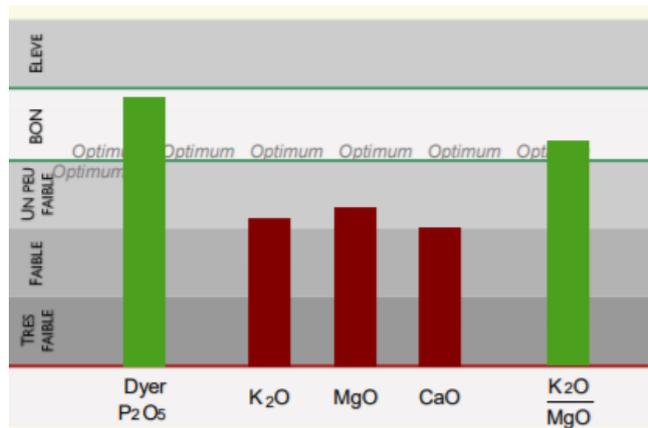


Figure 10 : résultats d'une analyse (SADEF)

déstabilisé.

Avec les maladies, les carences sont souvent synonymes d'un déséquilibre.

Lorsque les symptômes de carences sont visibles, l'état de sous-nutrition de la plante est déjà avancé. Il est préférable de les anticiper ; une analyse de sol permet de faire l'état des lieux des teneurs en éléments majeurs et d'adapter ses pratiques.

## CARENCES

Figure 11 : Carences, causes et conséquences. Sources : Interval, guide cultural. YARA. Unifa.

Élément	Cause possible de la carence	Rôle	Remarque
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Chaulage excessif Excès de Mn, Fe ou Zn pH > 7 ou <5.5 MO faible Hydromorphie	Croissance de tous les organes dont le système racinaire Rôle clé dans la division cellulaire et la respiration cellulaire	Les sols de franche comté sont très souvent déficitaires et Phosphore
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Chaulage excessif Excès de N pH <5.5 Conditions lessivantes Excès de MgO	Port de la plante, Transfert des acides aminés vers les racines, rôle dans la photosynthèse	Attention au rapport K/Mg : ces deux éléments sont antagonistes : si le rapport est <1 K est pénalisé. S'il est >2, Mg est pénalisé.
<b>MgO</b>	Chaulage excessif Excès de K, Ca Hydromorphie MO élevée	Métabolisme de P Synthèse protéique Activation enzymatique Port de la plante	Attention au rapport K/Mg
<b>CaO</b>	Conditions lessivantes Sécheresse	Réduction du Nitrate en ammonium → assimilation de l'azote Parois cellulaires	

## EVALUATION

Les analyses de laboratoires sont interprétées sous forme graphique, on y trouve pour chaque élément une teneur faible, bonne ou trop élevée. (Voir figure 5) Ces interprétations sont propres à chaque laboratoire et correspondent au type de sol. La méthode de notation de ce critère dépend donc de ces résultats :

Note de 1	Note de 2	Note de 3	Note de 4	Note de 5
Présence de tous les éléments en quantité suffisante.	Déficit modéré de quelques éléments (Teneur « un peu faible » de 1 à 3 nutriments)	Clair déficit de quelques nutriments (2 maximum, teneur de faible à très faible)	Clair déficit de la plupart des éléments (teneur faible)	Déficit extrême, teneurs très faibles pour la plupart des nutriments (ou tous)

Source : The Muencheberg soil quality rating

## La teneur en oligo-éléments

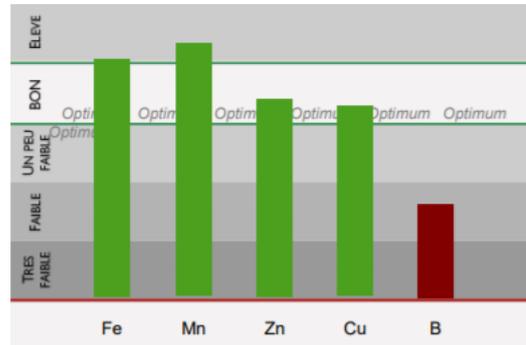
### DEFINITION & INTERET

Chaque oligo-élément joue un rôle essentiel dans le développement des cultures. La quantité absorbée est très faible (quelques dizaines de grammes par hectare) mais ils sont indispensables à la bonne santé du végétal.

Les plus souvent analysés et ceux sur lesquels nous nous concentrons sont le fer, le manganèse, le cuivre, le Zinc, le bore et le molybdène.

Cobalt, nickel, iode et sélénium ont aussi leur

rôle même si leurs concentrations sont infimes. A trop forte concentration ces éléments peuvent également être toxiques.



### CARENANCES

Figure 12 :Carenances, causes et conséquences. Sources : Interval, guide cultural. YARA. Unifa. Kali

Élément	Causes possibles de la carence	Rôle
<b>Fe</b>	pH>7 Hydromorphie Manque de K Ca élevé Chaulage excessif	Synthèse enzymatique Photosynthèse Fixation de l'azote de l'air
<b>Mn</b>	Chaulage excessif Excès de Fe pH > 7 Hydromorphie MO élevée	Réduction des nitrate Photosynthèse
<b>Zn</b>	Chaulage excessif Excès d'azote pH > 7 MO faible Hydromorphie	Métabolisme de l'auxine (élongation cellulaire) Protection des conditions de sécheresse
<b>Cu</b>	MO faible	Synthèse de la chlorophylle Photosynthèse Fertilité du pollen
<b>B</b>	pH > 7 Sécheresse	Multiplication cellulaire production de pollen Métabolisme des sucres
<b>Mo</b>	Excès de Soufre pH acide	Réduction des Nitrates Fixation de l'azote de l'air

## EVALUATION

Méthode identique à celle utilisée pour les éléments majeurs.

Note de 5	Note de 4	Note de 3	Note de 2	Note de 1
Présence de tous les éléments en quantité suffisante.	Déficit modéré de quelques éléments (Teneur « un peu faible » de 1 à 3 nutriments)	Clair déficit de quelques nutriments (2 maximum, teneur de faible à très faible)	Clair déficit de la plupart des éléments (teneur faible)	Déficit extrême, teneurs très faibles pour la plupart des nutriments (ou tous)

Source : *The Muencheberg soil quality rating*

## La teneur en matière organique

### DEFINITION & INTERET

La matière organique est au centre du fonctionnement du sol, avec de nombreux rôles :

- C'est le substrat de base des organismes du sol (micro et macrofaune) : ils se nourrissent en métabolisant la matière organique puis servent eux même de substrat à leurs prédateurs.
- C'est un réservoir d'éléments nutritifs indispensables aux plantes cultivées
- Elle influe fortement sur la capacité du sol à retenir les éléments nutritifs
- Elle contribue à la structuration du sol, en participant à la formation du complexe argilo-humique et à la formation de macro porosité, permettant un bon fonctionnement racinaire et l'infiltration de l'eau
- Elle contribue à augmenter la réserve utile en eau.

Les nombreuses fonctions de la matière organique et sa nécessité pour les plantes cultivées font de la teneur en MO un indicateur pertinent.

### EVALUATION

- Si la matière organique < 15g/kg de terre, soit 1.5%: le sol n'a plus de réserves de nutriments d'où une limitation de la biomasse du sol, impliquant une baisse de fertilité du sol et son incapacité à s'adapter aux conditions de culture (en cas de stress, la plante souffrira immédiatement).

*Attention, ces valeurs constituent des repères, mais le taux de MO varie selon la texture du sol. Il est plus élevé en sol argileux qu'en sol sableux. Ces valeurs sont donc à utiliser avec précautions.*

- Si la matière organique > 45g/kg, soit 4.5%: une grosse partie de la matière organique n'évolue plus ou pas. (Caplnov)

Dans tous les cas de figure, c'est d'avantage la vie du sol que le taux de matière organique lui-même qui est important : voir le paragraphe suivant pour le rapport C/N

Note de 1	Note de 3	Note de 5
2 à 4 % de MO	Plus de 4 % de MO OU entre 1.5 et 2%	Moins de 1.5 % de MO

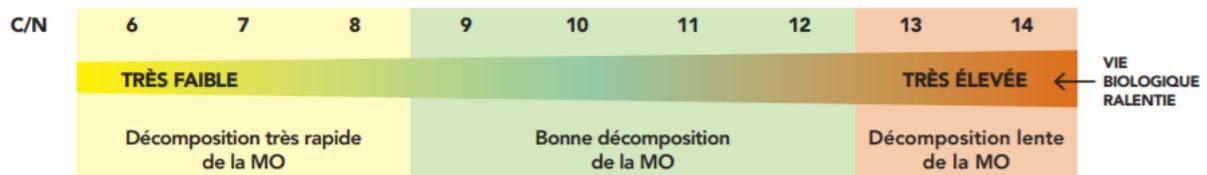
## Le rapport C/N

### DEFINITION

Le rapport C/N est utilisé pour caractériser l'évolution des matières organiques dans le sol.

Un rapport C/N faible est signe de décomposition trop rapide de la matière organique ; il sera alors conseillé de réaliser des apports de MO stable. Avec un rapport C/N trop élevé, l'activité biologique du sol est trop faible : il est utile de stimuler l'activité du sol (drainage pour réduire l'hydromorphie, apports d'engrais organiques à minéralisation rapide...)

### EVALUATION



Note de 1	Note de 3	Note de 5
C/N compris entre 8 et 11	C/N compris entre 7 et 8 ou entre 11 et 13	C/N inférieur à 7 ou supérieur à 13

## La capacité d'échange cationique et le taux de saturation

### DEFINITION

Il s'agit du « réservoir » du sol, permettant la fixation des cations échangeables (éléments chargés positivement, principalement  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  et  $Ca^{++}$ ) sur le complexe argilo humique.

Plus la CEC est élevée plus le sol a la capacité de stocker ces éléments. Cette capacité d'échange cationique dépend du taux de matière organique ainsi que du taux d'argile : Un sol argileux aura une CEC plus élevée qu'un sol sableux.

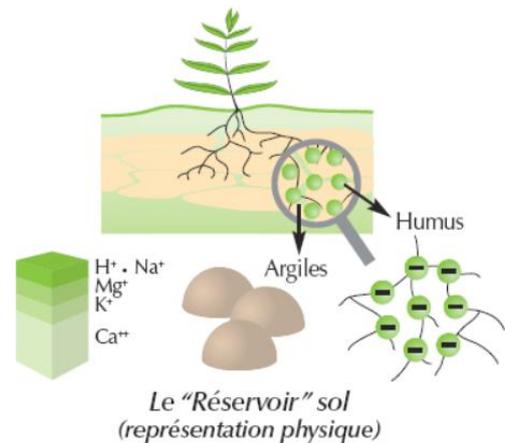


Figure 13 : représentation de la CEC (wiki Aurea)

Il est intéressant de regarder **le taux de saturation de la CEC (S/CEC)** : cette valeur représente le taux de remplissage du réservoir sol. Cette saturation est liée au pH : plus le pH est acide plus il y a d'ions  $H^+$  fixés sur le CAH, à la place des autres éléments : ainsi, le taux de saturation sera faible. En sols basiques le taux de saturation sera élevé. Un pH proche de la neutralité est donc souhaitable pour faciliter les échanges de cations. La CEC, le taux de saturation et le pH seront notamment utiles pour déterminer les besoins en amendements basiques. (voir page 28)

## LA FERTILITE BIOLOGIQUE

### DEFINITION

La fertilité biologique du sol influe sur l'état physique du sol, la quantité de matière organique et la disponibilité des éléments nutritifs..

L'indicateur choisi consiste à compter les vers de terre des trois grandes familles : anéciques, épigés et endogés. Cette population peut être affectée par la structure, la texture, le pH ou encore la quantité de matière organique du sol.

Il est important d'évaluer la fertilité biologique car elle est liée à l'ensemble des autres paramètres du sol. Si nous avons choisi de le faire avec le protocole de comptage des vers de terre de l'OPVT c'est pour les caractéristiques de ce test : économique, acquisition des données et interprétation facile.

Attention toutefois à ne pas utiliser cet indicateur seul, il est intéressant en complément des précédents, comme confirmation.

## EVALUATION

Le comptage des vers de terre peut se faire en même temps que le test bêche : Effectivement il s'agit de prélever 6 bêchées et de compter dans chacune d'elle les vers adultes. Ce test est à réaliser entre février et Avril, période d'activité maximale des vers de terre.

Le protocole complet est disponible ici : <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page.php?60> .

Par souci de simplification nous retiendrons les valeurs ci-dessous (moyenne du nombre de vers dans les 6 bêchées) pour l'évaluation de e la fertilité biologique :

Note de 1	Note de 3	Note de 5
Plus de 8 vers par bêchée	4 à 8 vers par bêchée	Moins de 4 vers par bêchée

Pour information, il existe 3 types de vers de terre :

Epigés	Anéciques	Endogés
 <p><i>Source : Arena-auximore</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Petite taille (1 à 5 cm)</li> <li>• Couleur foncée, rougeâtre</li> <li>• Vivent en surface</li> <li>• Se nourrissent de la matière organique de surface</li> </ul>	 <p><i>Source : Atlas DC</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande taille (10 à 100 cm)</li> <li>• Couleur foncée, tête rouge ou noire</li> <li>• Vivent dans des galeries verticales, connectées à la surface du sol</li> <li>• Enfouissent la matière organique prélevée en surface</li> </ul>	 <p><i>Source : Atlas DC</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Taille moyenne (3 à 20 cm)</li> <li>• Faiblement coloré</li> <li>• Vivent en profondeur</li> <li>• Se nourrissent sous la surface du sol</li> </ul>

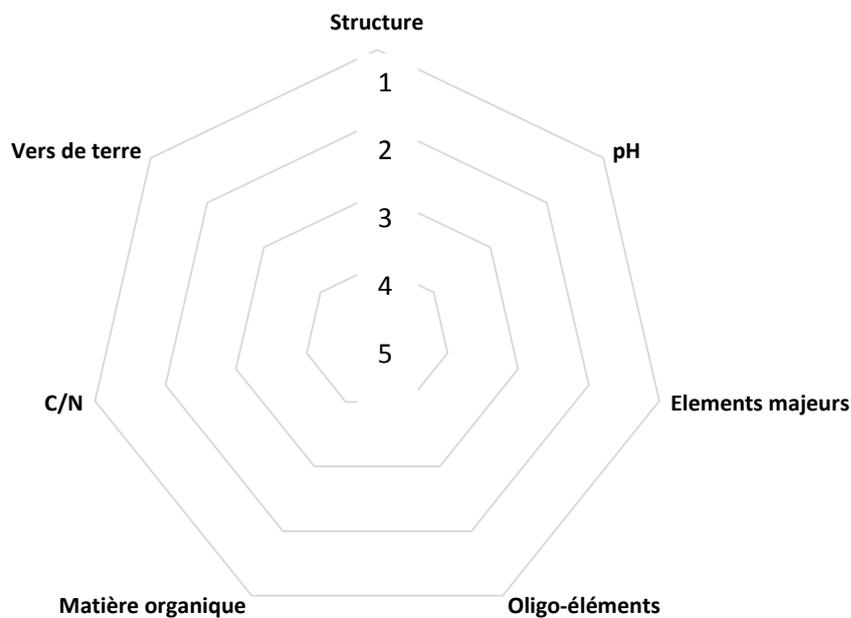
## FICHE PARCELLE

Une fois ces l'ensemble de ces indicateurs évalués sur le terrain, vous pouvez remplir la grille « critères sols » afin de déterminer le potentiel en onction de la note totale :

Indicateur	Observation	Note attribuée	Note possible
<b>Texture</b>			1, 2 ou 3
<b>Profondeur</b>			1, 2 ou 3
<b>Indice de différenciation texturale</b>			1, 3 ou 6
<b>Pierrosité</b>			1, 2 ou 3
<b>Hydromorphie</b>			1, 3 ou 6
		<b>Total :</b>	<b>Total : de 5 à 21</b>

*Potentiel : Bon (de 5 à 10), Moyen (de 10 à 14), Faible (14 et plus)*

Puis représenter les notes des autres indicateurs sur ce graphique, pour repérer rapidement la problématique :



## QUESTIONS FREQUENTES

### COMMENT AMELIORER LA STRUCTURE ?

En cas de classe 4 ou 5 avec le test bêche et 3 avec la méthode Pepone, l'intervention mécanique est nécessaire. Selon les cultures elle est envisageable en cas de classe 3 au test bêche et 2 avec la méthode Pepone.

Il est recommandé de réaliser un décompactage avec un outil à dents droites sur les 2 tiers la profondeur de la zone compactée. L'intervention sur toute la profondeur du tassement n'est généralement pas nécessaire : la fissuration va continuer naturellement dans les cm sous le passage de la dent.



Pour éviter la reprise en masse rapide et améliorer la qualité du décompactage, l'idéal est d'intervenir dans un couvert végétal pour permettre aux racines de passer dans les fissures et de continuer le travail



Figure 14 : Un outil de décompactage, Actisol

## AMENDEMENTS BASIQUES, COMMENT AGIR ?

L'objectif du chaulage et de réserver le capital du sol et de maintenir un pH suffisant pour les cultures. Il va améliorer la structure des sols et compenser l'acidité.

Effectivement l'acidification est un phénomène naturel en sols non calcaires, qui va être accentué par les pratiques culturales comme :

5. L'exportation des résidus de culture
6. L'apport d'engrais ammoniacal
7. Une irrigation mal maîtrisée
8. La présence fréquente de légumineuses dans la rotation

*Attention, un chaulage excessif, en plus d'entraîner un coût inutile, peut entraîner des carences induites ! Il est nécessaire d'adapter les apports en fonction des besoins des parcelles.*

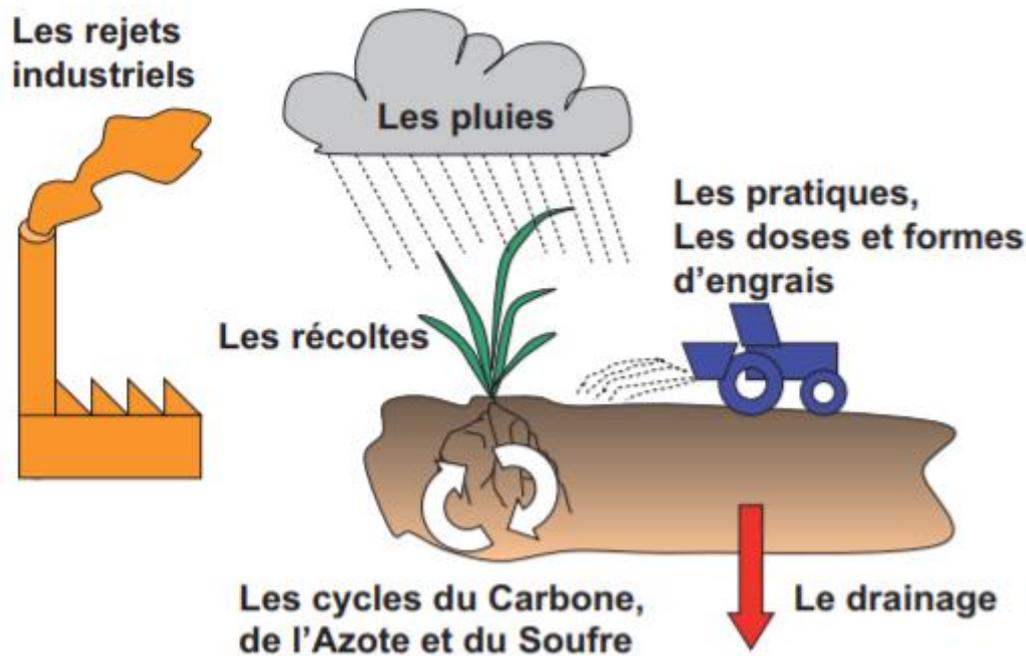


Figure 15 : les causes de l'acidification des sols (Comifer)

### Etape 1 : l'analyse de terre

L'analyse de terre est la meilleure façon, et la plus fiable de déterminer le besoin en amendement basique du sol. Effectivement, même si le test à l'acide réalisé sur le terrain donne une indication du calcaire total, il n'est pas précis ni suffisant pour ajuster les apports.

Trois éléments de l'analyse de terre sont à considérer : le pH, la CEC Metson (à pH 7) et le taux de saturation.

### Etape 2 : Définir l'objectif

Chacun de ces trois éléments (pH, CEC, Taux de saturation S/CEC) présentent une valeur actuelle. Il faut déterminer si celle-ci est convenable ou si elle doit être améliorée. Dans le premier cas, le chaulage n'est pas nécessaire. Dans le second, il faut déterminer l'objectif à atteindre : par exemple une augmentation de 0.5 points de pH ou une saturation de la CEC.

Dans l'absolu, il n'existe pas de statut acido-basique souhaitable universel. Dans la pratique, on le détermine en prenant en compte le type de sol (un sol sableux aura toujours une CEC plus faible qu'un sol argileux) et le système de culture.

Quelques exemples : (Source : fertilisation-edu)

- Grandes cultures et prairies temporaires : pH eau 6,5 à 6,8, S/CEC 100 à 120%
- Systèmes betteraviers et endiviers : pH eau 7,0, à 7,5, S/CEC > 130%
- Prairies de longue durée : pH eau 6,3, S/CEC 90%
- Vigne : pH eau 6,2 à 7,0, S/CEC 85 à 130%

Le tableau ci-dessous présente les valeurs seuil des indicateurs du statut acido basique (source : Comifer)

Domaine	Très acide	Acide	Peu acide	Neutre
pH eau	5.5	5.8	6.5	7.2
S/CEC Metson	55	70	100	150
Ca/CEC Metson	45	55	85	130
Calcaire total	Absence			Présence

### Etape 3 : Calculer l'apport de VN

La dose de valeur neutralisante à apporter se calcule en fonction du pH ou de la CEC et du taux de saturation S/CEC.

Si les pratiques vont dans le sens de l'acidification (apports d'engrais ammoniacaux, rendements élevés, exportations des résidus...) il est conseillé de réaliser des apports d'entretien chaque année.

**VN = valeur neutralisante. 1VN = 1kg de CaO**

Ex : apport de 100kg de carbonate à 54% de CaO = apport de 54 VN

**Calcul avec la CEC et le taux de saturation :**

$VN = CEC \text{ (en meq)} \times (\text{taux de saturation souhaité} - \text{taux de saturation actuel}) \text{ (en \%)} \times 0.28 \times \text{masse de terre par hectare}$

Avec :

0.28 coefficient pour passer de Ca<sup>2+</sup> à CaO

Masse de terre : profondeur (de 5 à 60cm, soit profondeur du labour OU 10cm en prairie) x densité (entre 1.2 et 1.8) x pourcentage de terre fine (=100 - %cailloux)

**Exemple :**

Un sol de 25cm de profondeur, densité 1.5, 95% de terre fine avec une CEC actuelle de 10meq saturée à 70%. L'objectif est d'atteindre une saturation de 80 % :

$$\begin{aligned} & 10 \times (80-70) \times 0.0028 \times (25 \times 1.5 \times 95) \\ & = 10 \times 10 \times 0.0028 \times 3562 \\ & = 998 \text{ VN} \end{aligned}$$

➔ Si le produit utilisé contient 54 % de CaO, il faudra apporter 1848 kg / ha ( $1848 \times 54\% = 998$ )

Attention, en cas de faible CEC la capacité de stockage est faible : il faudra alors fractionner les apports et privilégier un produit à solubilité lente pour éviter le lessivage de la part non stockée.

Un logiciel de calcul des besoins est disponible ici : <http://www.ipa-chaulage.info/le-raisonnement-du-chaulage-et-calcul-des-besoins.html>

## BIBLIOGRAPHIE

Archambeaud M, Thomas F. 2016. Les sols agricoles. Editions France agricole. 273 p.

Agro transfert. Guide du mini profil 3D. [en ligne] consulté le 12/05/2018. <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2017/04/Guide-m%C3%A9thodique-du-mini-profil-3D-version-web-6M.pdf>

Baize D. 2004. Petit lexique de pédologie. Editions QUAE. 288 p.

Capinov. Analyses de sol, valeurs fertilisantes. Dossiers d'experts [en ligne] consulté le 21/06/2018. <http://www.capinov.fr/analyse-de-sol-laboratoire-php.php>

Chambre d'agriculture de la Drôme. La vie dans les sols. Agr'eau n°26. [en ligne] consulté le 03/05/2018. [http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/16750/\\$File/Objectifs\\_69.pdf?OpenElement](http://rhone-alpes.synagri.com/synagri/pj.nsf/TECHPJPARCLEF/16750/$File/Objectifs_69.pdf?OpenElement)

Decoopman B. Le chaulage, très souvent indispensable. Terra du 02/09/2011. [en ligne] consulté le 20/06/2018. [http://www.synagri.com/ca1/PJ.nsf/b1bff1bdc37df748c125791a0043db4a/86cbc65d0deb3620c1257f160046cb94/\\$FILE/Amendements-basiques-chaulage-tres-souvent-indispensable2011-09.pdf](http://www.synagri.com/ca1/PJ.nsf/b1bff1bdc37df748c125791a0043db4a/86cbc65d0deb3620c1257f160046cb94/$FILE/Amendements-basiques-chaulage-tres-souvent-indispensable2011-09.pdf)

EcoBioSol. Protocole participatif – test bêche vers de terre. [en ligne] consulté le 10/02/2018 <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/page.php?60>

GIEC. 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques, résumé à l'attention des décideurs. 34 p.

*Interval, Comprendre l'analyse de terre (pages 10 -13), Guide cultural 2012. 192p.*

Kali GmbH, Eléments nutritifs. Informations techniques [en ligne], consulté le 15/06/2018. [http://www.kali-gmbh.com/frfr/fertiliser/advisory\\_service/nutrients/boron.html](http://www.kali-gmbh.com/frfr/fertiliser/advisory_service/nutrients/boron.html)

Marsden C. Importance des matières organiques du sol. Supagro [en ligne] consulté le 002/06/2018. <http://www.supagro.fr/ress-pepites/AC/co/ImportanceMOS.html>

Mueller L, Schindler U, Behrendt A, Eulenstein F, Dannowski R. 2007. The Muencheberg soil quality rating (SQR) Field manual for detecting and assessing properties and limitations of soils for cropping and grazing.

Unifa. Oligo éléments. Unifa, bien nourrir les plantes pour mieux nourrir les hommes [en ligne] consulté le 02/06/2018 <http://fertilisation-edu.fr/nutrition-des-plantes/le-role-des-elements-nutritifs/oligo-elements.html#autres>