

# MANUEL

---

## DE FORMATION

- GESTION DE L'ENVIRONNEMENT -

## GESTION DES SOLS



Ce manuel de formation a été conçu et réalisé par les services Formation et Information & Communication du COLEACP.

La présente publication a été élaborée par le COLEACP dans le cadre de ses programmes Fit For Market, Fit for Market SPS et STDF, financés par l'Union européenne (Fonds européen de développement – FED), l'Agence Française de Développement (AFD) et Le Fonds pour l'application des normes et le développement du commerce (STDF)

Le contenu de la présente publication relève de la seule responsabilité du COLEACP et ne peut aucunement être considéré comme reflétant le point de vue officiel de l'Union européenne, de l'AFD et du STDF.

Le COLEACP détient la propriété intellectuelle de l'ensemble du document.

Cette publication fait partie intégrante d'une collection COLEACP, composée d'outils de formation, de supports pédagogiques et de documents techniques. Tous sont adaptés aux différents types de bénéficiaires et niveaux de qualification rencontrés dans les filières de production et de commercialisation agricoles.

Cette collection est disponible en ligne pour les membres du COLEACP.

L'utilisation de tout ou partie de la publication est possible dans le cadre de partenariats ciblés et selon certaines modalités. Pour cela, contacter le Coleacp à [network@coleacp.org](mailto:network@coleacp.org).



# GESTION DES SOLS

<b>CHAPITRE 1: FONDEMENTS DE LA SCIENCE DES SOLS</b> .....	1
1.1. Introduction à la science des sols .....	2
1.2. La formation des sols et les types de sols .....	21
1.3. Les propriétés importantes des sols .....	33
1.4. Les principales fonctions du sol .....	55
<b>CHAPITRE 2: FERTILITÉ ET FERTILISATION DES SOLS</b> .....	65
2.1. La fertilité des sols .....	66
2.2. Comment apprécier la fertilité? .....	75
2.3. La fertilisation des sols et les éléments fertilisants .....	85
2.4. Rôle et nature des amendements du sol .....	108
2.5. Rôle de la phase aqueuse des sols dans la fertilité des sols .....	113
2.6. Annexes .....	116
<b>CHAPITRE 3: LES CAUSES DE LA DÉGRADATION DES SOLS</b> .....	147
3.1. La dégradation des sols est due essentiellement à l'homme .....	148
3.2. L'érosion des sols .....	160
3.3. Influence des pratiques culturales sur la fertilité du sol .....	165
3.4. Les conséquences sur les sols de la déforestation .....	170
3.5. Les conséquences du surpâturage .....	174
3.6. La salinisation des sols .....	176
3.7. La compaction du sol .....	182
3.8. La pollution des sols .....	185
<b>CHAPITRE 4: PRÉSERVER ET RESTAURER LA FERTILITÉ DES SOLS</b> .....	193
4.1. Préserver la qualité et la fertilité des sols .....	194
4.2. Restaurer la fertilité des sols .....	217

<b>CHAPITRE 5: ÉTUDE DE CAS</b> .....	233
5.1. Une étude de cas : pourquoi ? comment ? .....	234
5.2. Partie 1 : Mise en situation .....	236
5.3. Partie 2 : Analyse des causes .....	242
5.4. Partie 3 : Recherches de solutions appropriées .....	251
5.5. Partie 4 : Plan d'actions .....	263
<b>GLOSSAIRE</b> .....	267
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	277
<b>SITES WEB UTILES</b> .....	285



# Chapitre 1

## Fondements de la science des sols

1.1. Introduction à la science des sols	2
1.2. La formation des sols et les types de sols	21
1.3. Les propriétés importantes des sols	33
1.4. Les principales fonctions du sol	55

## OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES

À l'issue de ce chapitre 1, l'apprenant sera capable :

- De comprendre ce qu'est un sol, pourquoi le gérer de façon durable, quelle est sa composition, quels sont ses principales fractions et ses constituants majeurs
- De comprendre comment se forme un sol au départ de la roche-mère et les facteurs contribuant à déterminer les caractéristiques du sol formé
- De comprendre la notion de «profil de sol» et d'identifier quelques types de sols représentatifs de diverses régions des ACP et de divers climats
- D'identifier les principales propriétés des sols (physiques, chimiques et biologiques)
- De connaître les différentes fonctions d'un sol

## 1.1. INTRODUCTION À LA SCIENCE DES SOLS

### 1.1.1. Le sol est le principal actif de l'agriculteur : il doit être géré durablement

La vie humaine est tributaire de l'agriculture. La capacité de la terre à soutenir les activités agricoles donne une mesure primaire de sa valeur économique, et est généralement mesurée sur la base de la **capacité du sol à assumer certaines fonctions clés qui soutiennent les cultures**. Ce n'est pas par hasard que les sociétés les plus riches se sont développées dans les zones où la fertilité inhérente du sol est élevée.

Le mot «sol» indique les matières minérales et organiques non consolidées sur la surface de la terre qui sert de milieu naturel pour la croissance des plantes. Il est donc un attribut fondamental qui détermine la productivité primaire et la vie sur terre. Le sol est inséparable de la terre, principal intrant et facteur de production en agriculture (Consortium Africain pour la Santé des Sols, CAB, 2015).

Le sol est le **principal actif de l'agriculteur**, et sa bonne gestion va économiquement valoriser les terres à long terme. C'est pourquoi il est important en la matière de parler de «gestion durable des sols» : la gestion intégrée de la fertilité du sol vise **l'utilisation optimale et durable** des réserves en nutriments dans le sol, des engrais minéraux et des amendements organiques.

Si gérer la fertilité des sols et développer des systèmes de production durables est une **préoccupation essentielle** en agriculture conventionnelle, c'est encore plus vrai en agriculture biologique. La gestion durable des sols est une exigence de **certains référentiels**. Ainsi le référentiel GLOBALG.A.P. a des exigences précises en ce qui concerne les sols, le maintien de leur structure et la prévention de l'érosion par exemple). De même le cahier des charges Fair Trade déclare se consacrer aux méthodes agricoles écologiques en vue de protéger et de maintenir la biodiversité. Fair Trade vise l'utilisation limitée et sûre des produits chimiques, la gestion des déchets, **le contrôle de l'érosion, le maintien de la fertilité des sols** et une gestion responsable de l'eau. L'abattage des forêts primaires est interdit (Info Label, Fair Trade : Max Havelaar).

En **agriculture biologique**, parmi ses objectifs généraux le Règlement (CE) 834/2007<sup>1</sup> souhaite que soit établi «un système de gestion durable pour l'agriculture qui respecte les systèmes et cycles naturels et maintient et améliore la santé du sol». Le règlement exige donc que la gestion des sols permette non seulement le maintien (voire l'amélioration) de la fertilité des sols (ex: selon l'article 12, la fertilité et l'activité biologique du sol sont préservées et augmentées par la rotation pluriannuelle des cultures) mais aussi la prévention de l'érosion et du tassement des sols.

L'agriculteur peut exploiter les potentialités de son sol pour assurer une production en quantité et en qualité, mais il doit veiller à ne pas entamer son «capital-sol» par une surexploitation de cette ressource que beaucoup pensent illimitée. Le manque de fertilité du sol entraîne une baisse des rendements et favorise également le développement de nombreuses maladies des plantes. Si la fertilité du sol est médiocre, les cultures manquent de force et deviennent donc plus sensibles aux maladies et aux parasites. La présence de ces derniers entraîne une nouvelle diminution de la productivité et menace encore davantage les moyens d'existence des communautés rurales.

Pour **maintenir à long terme la fertilité du sol**, il faut commencer par **comprendre de quoi se compose un sol, comment il fonctionne**, quelles sont les relations entre ses diverses composantes, quels sont les impacts des diverses pratiques agricoles sur la fertilité, quels sont les moyens de la préserver ou même de la restaurer si nécessaire. Pour comprendre le sol, il faut s'intéresser, par exemple, à la matière organique et aux substances nutritives, s'interroger sur des concepts importants dans la science du sol, comme la texture, la structure, l'humification, le rôle des organismes du sol, les agrégats ou colloïdes et étudier les propriétés chimiques du sol, comme le pH (qui indique l'acidité) et la CEC (capacité d'échange cationique qui détermine la capacité du sol à fixer certains éléments) (Van Schöll, 2005).

Malgré toute cette complexité, pour assurer ses rendements, **l'agriculteur doit être capable d'estimer la qualité de son sol** (déterminer un certain nombre de facteurs importants comme la texture et la structure du sol) et juger de sa fertilité (taux de matière organique, bilan des réserves de matières nutritives, mesure de l'acidité ou de la porosité du sol,...).

La fertilité du sol dépend de son origine (sols alluviaux, sols développés sur des différents types de roche mère), de sa texture, de sa structure, de sa teneur en matière organique et de la gestion de cette fertilité par le producteur dans le passé. Un bon indicateur pour la fertilité d'un sol est sa couleur. Des sols avec des couleurs foncées sont en général riches en matière organique (richesse en carbone). Les sols rouges, caractéristiques pour une bonne partie de l'Afrique subsaharienne sont en général acides et très pauvres en matière organique. Support physique des cultures, **un sol fertile doit avoir une structure et une profondeur** qui permettent aux plantes de développer leurs racines pour s'ancrer, retenir l'humidité et évacuer l'eau en excès. Sa **composition et son pH** doit permettre un bon approvisionnement en éléments nutritifs (N, P, K et autres oligoéléments). **Un sol fertile est un sol vivant**, riche en

<sup>1</sup> Règlement relatif à la production biologique et à l'étiquetage des produits biologiques (Journal officiel de l'Union européenne L 189/1).

vers de terre, insectes, nématodes, champignons et bactéries, qui contribuent au recyclage de la matière organique et maintiennent une bonne porosité. Un sol fertile permet enfin d'accueillir les auxiliaires de culture.

**Par ses pratiques culturales, un agriculteur peut améliorer ou réduire la fertilité de son sol** (ex : améliorer ou détruire sa structure), **enrichir ou appauvrir le stock de matières nutritives** du sol. L'incorporation de fertilisants (minéraux et organiques), de résidus de récolte, de fumiers, de composts et d'engrais verts enrichissent le sol en divers nutriments, tandis que la récolte en enlève une partie. Il existe donc des « **cycles de nutriments** » dans le sol, qui peuvent être en équilibre ou en déséquilibre. Sans l'intervention de l'homme, ces cycles de nutriments dans le sol sont en général en équilibre. Mais en réalité ce genre de situation est rare.

Selon Wopereis *et al.* (2008)<sup>2</sup>, en Afrique subsaharienne les paysans sont souvent obligés de fragiliser leurs terres: ils en tirent plus de nutriments qu'ils n'en retournent. Sur les plateaux, la pratique du défriche brûlis pour faciliter la mise en culture d'un champ réduit la teneur en carbone du sol et peut lessiver des quantités importantes d'autres nutriments avec les premières pluies. Les producteurs sont ensuite souvent obligés d'utiliser la même parcelle pendant plusieurs années sans intrant. Avec chaque récolte des nutriments sont donc évacués du champ sans être remplacés. Une pratique pour améliorer la fertilité du sol est de laisser la parcelle pendant un certain temps en jachère. Malheureusement, cette pratique devient de moins en moins fréquente en Afrique, où les paysans sont obligés d'intensifier l'utilisation de leurs terres, souvent sans compenser les pertes de nutriments provoquées.

**L'exportation excessive de nutriments** sans compensation entraîne à long terme un déséquilibre de nutriments dans le sol. Les sols dans les basfonds sont en général plus robustes et plus fertiles que les sols des plateaux mais une mauvaise gestion de la fertilité du sol peut provoquer des carences en nutriments à long terme de ces sols. Il a été estimé que pendant les 30 dernières années, en moyenne 22 kg d'azote, 15 kg de potassium et 2,5 kg de phosphore ont été perdus par hectare chaque année sur 200 millions d'hectares de terres cultivées en Afrique subsaharienne (en excluant l'Afrique du Sud). Ce bilan négatif a pour effet l'appauvrissement des sols et la réduction de la production agricole.

Si les préoccupations sur la qualité des sols sont très anciennes, **la prise de conscience internationale de l'importance d'une préservation et d'une gestion durable de cette ressource**, suivie des mesures concrètes de sa protection, est très récente à l'instar des deux autres principales ressources terrestres : l'eau et l'air.

Selon Winfried Blum (Union Internationale des Sciences du Sol) les propositions de convention sur l'utilisation durable des sols ont été adoptées rapidement après le Sommet de la Terre (Rio de Janeiro, juin 1992) et sont entrées en vigueur en décembre 1996. Cependant, l'efficacité des mesures de protection qui devront être adoptées dépend largement de méthodes de diagnostic fiables de l'évaluation du fonctionnement et des modifications de la qualité du sol...dont la définition donne toujours lieu à de nombreuses interprétations en réponse aux préoccupations

<sup>2</sup> Curriculum APRA-GIR : Manuel technique, Référence 15 - La gestion intégrée de la fertilité du sol (Wopereis *et al.*, 2008), pp. 57-58.



sociales et scientifiques actuelles. Or les enjeux mondiaux de la sécurité alimentaire de la planète appellent à répondre au défi d'une agriculture écologiquement durable axée sur la sauvegarde du sol et de l'environnement.

### 1.1.2. Définition d'une gestion durable des sols

Pour cette définition nous nous référerons intégralement à celle donnée par la FAO en 2017 dans les « *Directives volontaires pour une gestion durable des sols* » (FAO, 2017).

Une gestion durable des sols se caractérise par les 11 éléments suivants :

1. Faible érosion hydrique et éolienne des sols
2. Absence de dégradation de la structure du sol (absence de compactage, par exemple), celui-ci offrant une surface stable permettant à l'air, à l'eau et à la chaleur de circuler, ainsi qu'aux racines de pousser
3. Présence d'un couvert végétal (végétaux sur pied, résidus de végétaux, etc.) suffisant pour protéger le sol
4. Réserve de matière organique du sol stable ou croissante et, idéalement, proche du niveau optimal pour l'environnement local
5. Disponibilité et circulation des éléments nutritifs à un degré adapté au maintien ou à l'amélioration de la fertilité et de la productivité du sol, et à la réduction des déperditions de fertilité et de productivité dans l'environnement
6. Salinisation, sodisation et alcalinisation faibles du sol
7. Infiltration et stockage de l'eau (issue des précipitations et de sources complémentaires telles que l'irrigation) efficaces, c'est-à-dire permettant de répondre aux besoins des végétaux et d'assurer le drainage de tout excédent
8. Concentration en contaminants inférieure aux niveaux de toxicité, c'est-à-dire susceptibles de présenter un danger pour les végétaux, les animaux, l'homme et l'environnement
9. Biodiversité du sol assurant l'éventail complet des fonctions biologiques ;
10. Systèmes de gestion des sols reposant sur une utilisation optimisée et sans danger des intrants (dans le cadre la production d'aliments, de fourrage, de carburant, de bois d'œuvre et de fibres)
11. Imperméabilisation du sol réduite le plus possible, grâce à une planification responsable de l'utilisation des terres.



Tous ces points, qui sont la base même d'une gestion durable des sols, seront développés dans ce manuel au cours des divers chapitres, depuis la formation du sol jusqu'à sa préservation.

### 1.1.3. Qu'est-ce qu'un sol ?

### 1.1.3.1. Définition et importance du sol

Comme beaucoup de mots communs, le mot « sol » a plusieurs significations. Dans son sens traditionnel, **le sol est le milieu naturel pour la croissance des plantes**. Le sol a également été défini comme un corps naturel comprenant **des couches superposées** (ou **horizons**, désignés par des lettres comme O, A, B, E, C, ...) qui sont composées de matériaux altérés minéraux, de matières organiques, d'air et d'eau. On différencie le sol de la croûte terrestre par **la présence significative de vie**. On dit parfois que « *le sol, c'est l'épiderme vivant de notre planète* ».

Le sol est l'interface entre la terre, l'air et l'eau. Le sol est le **produit final de l'effet combiné du climat, de la topographie, de l'activité des organismes** (flore, faune mais aussi les hommes qui travaillent et exploitent le sol) sur les matériaux de base (roches et minéraux d'origine) au fil du temps. Nous reviendrons plus loin en détails sur les processus qui conduisent à la formation d'un sol.



Le sol est un milieu extrêmement complexe, variable et vivant : il abrite la majeure partie de la biosphère. Le sol est une ressource naturelle des plus précieuses.

Le sol est une **source de denrées alimentaires, de biomasse et de matières premières**. Il assure des fonctions de **stockage**, de **filtration** et de **transformation** de nombreuses substances, y compris **l'eau, les nutriments et le carbone**. Il représente le puits de carbone le plus important au monde (1 500 gigatonnes). Ces fonctions doivent être protégées en raison de leur importance socio-économique et environnementale. Nous détaillerons plus loin les diverses fonctions du sol.

Dans les zones tropicales humides, un sol peut s'édifier, à partir d'une base sablonneuse, au bout de 200 ans. Néanmoins, ce processus prend normalement beaucoup plus de temps. Dans la plupart des conditions, le sol se construit au rythme de 1 cm seulement tous les 100 à 400 ans, et il faut de 3000 à 12000 ans pour qu'il se forme une couche suffisante pour donner une terre productive. La formation des sols étant un processus extrêmement lent, **on peut en conclure qu'il s'agit essentiellement d'une ressource non renouvelable**<sup>3</sup>.

La **dégradation des sols représente donc un grave problème**. Elle est provoquée ou aggravée par des activités humaines telles que des pratiques agricoles et sylvicoles inadéquates, les activités industrielles, le tourisme, l'expansion urbaine et industrielle et les grands travaux. Nous exposerons quelles sont les sources et les conséquences de la dégradation des sols (érosion, salinisation, pollution, compaction, etc.).

Selon l'Atlas des sols d'Afrique<sup>4</sup>, en Afrique, certains sols peuvent être très vieux et reflètent souvent des changements radicaux de climat et de végétation. Les sols de couleur rouge dominant, indiquant un niveau élevé d'oxydes de fer. Près de la moitié de la superficie de l'Afrique est caractérisée par des sols sableux (22%), caillouteux peu profonds (17%) et peu développés (11%).

3 Voir aussi COLEACP, Manuel « Produire de façon durable et responsable », Chapitre 2.

4 Atlas des sols d'Afrique, Union européenne, 2015. 176 pp.

### 1.1.3.2. Composition du sol

Un échantillon de sol minéral est constitué (en masse) de minéraux (jusqu'à 95%), d'eau (15-35%), d'air (15-35%) et de matière organique (0-5%). Dans les régions arides, la quantité d'eau et de matière organique est nettement plus basse.

Comme l'illustre le tableau ci-dessous, le sol est constitué de **trois phases** :

- une **phase solide**, composée de **constituants minéraux** (sables, argile,...) et de **constituants organiques** (matière organique, MO) ;
- une **phase liquide** (encore appelée la **solution du sol**), composée d'eau dans laquelle sont dissoutes des substances solubles, comme des sels, provenant à la fois de l'altération des roches, de la minéralisation des matières organiques et des apports par l'homme (apports d'engrais solubles ou solubilisables par exemple) ;
- une **phase gazeuse**, ou atmosphère du sol (ou encore «phase vapeur»), composée des mêmes gaz que l'air, avec en plus des gaz provenant de la décomposition des matières organiques.

Tableau 1 : Nature des divers constituants (solides, liquides et gazeux) du sol.

Constituants solides		Constituants liquides	Constituants gazeux
Constituants minéraux	Constituants organiques	Solution du sol	Atmosphère du sol
<p><i>Terre fine du sol :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• argiles,</li> <li>• limons fins,</li> <li>• limons grossiers,</li> <li>• sables fins,</li> <li>• sables grossiers.</li> </ul>	<p><i>Matière organique fraîche :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• constituants des tissus végétaux (cellulose, hémicellulose, tanins...),</li> <li>• déjections animales et animaux morts.</li> </ul>	<p><i>Eau du sol et éléments solubles dissous :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• substances organiques (acides organiques, surs,...),</li> <li>• ions dans l'eau du sol : <math>\text{Ca}^{++}</math>, <math>\text{Mg}^{++}</math>, <math>\text{K}^+</math>, <math>\text{Na}^+</math>, <math>\text{NO}_3^-</math>, <math>\text{PO}_4^{3-}</math>,...</li> </ul>	<p><i>Constituants de l'air :</i> <math>\text{N}_2</math>, <math>\text{O}_2</math>, <math>\text{CO}_2</math></p> <p><i>Gaz issus de l'activité des animaux du sol et des processus de décomposition :</i> <math>\text{CO}_2</math>, <math>\text{H}_2</math>, <math>\text{CH}_4</math>,...</p>
<p><i>Éléments grossiers :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gravier,</li> <li>• Cailloux,</li> <li>• Pierre,</li> <li>• Blocs.</li> </ul>	<p><i>Matières humiques :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• matières organiques transformées</li> </ul>		

Pour comprendre comment s'organise ces divers constituants, on peut faire une « coupe » verticale du sol, appelée « profil », pour observer les différentes couches, plus ou moins parallèles à la surface. Elles se distinguent par leur composition, leur couleur, leur structure et leur texture (ex : les couches foncées contiennent en général plus de matière organique). Ces couches, appelées « horizons » (la plupart des sols présentent habituellement trois ou quatre horizons désignés par des lettres : O, A, E, B, C...), sont le fruit de plusieurs processus géologiques, physiques, chimiques et biologiques qui ont agi sur les matériaux parentaux (figure 1). Nous étudierons plus loin comment le sol se forme au départ de la roche-mère.

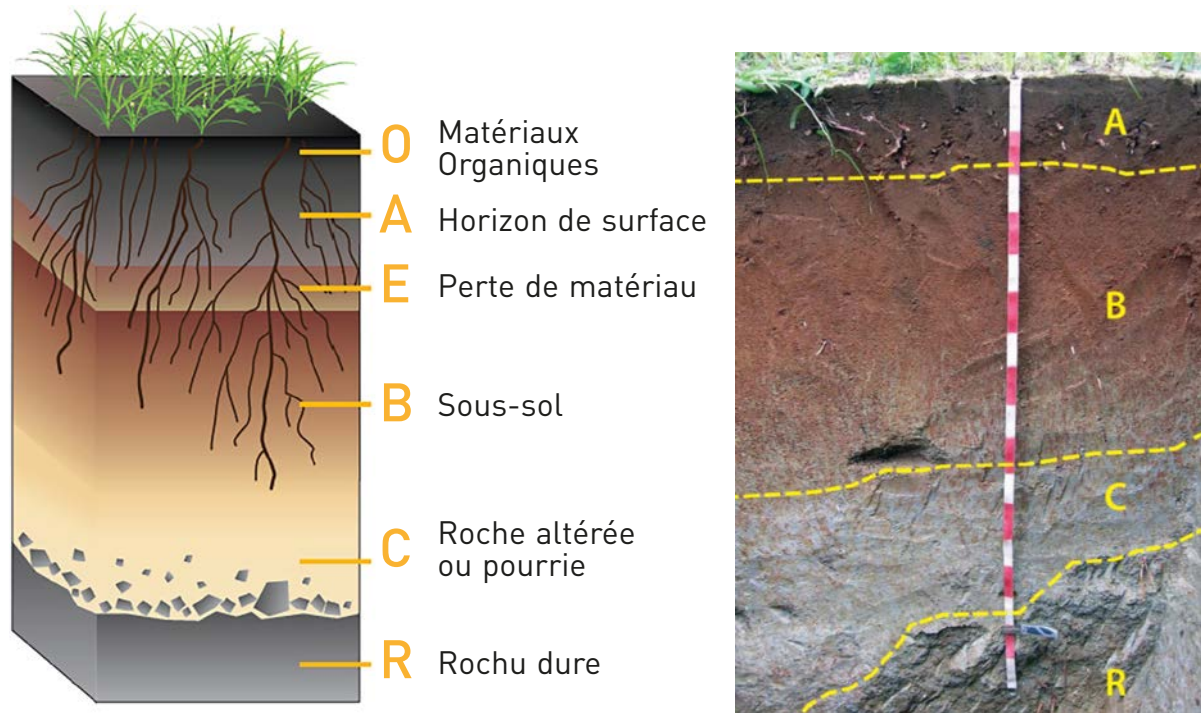


Figure 1 - Représentation schématique d'un profil de sol théorique (en coupe, les différentes couches ou horizons) et photo d'un profil de sol (source : Atlas des sols d'Afrique, UE 2015). À noter qu'il existe d'autres « horizons » particuliers, comme l'horizon S, dit d'altération (c'est un horizon B peu évolué dans lequel on observe des changements de couleur et l'apparition d'une structure réellement pédologique remplaçant la structure originelle de la roche. Mais, il n'y a pas enrichissement net en argile ou autres matières).

### Horizon O

C'est l'horizon superficiel où s'accumulent les matériaux organiques qui vont se décomposer et évoluer progressivement. Il s'agit de la **couche superficielle** comprenant des débris végétaux et de l'humus, ce que l'on nomme « **litière** ». On l'appelle donc « O » pour organique. On y trouve un grand nombre d'organismes qui vont fragmenter la litière en petits morceaux et l'intégrer au sol (ex : espèces fouisseuses). Grâce aux décomposeurs, la température et l'humidité du sol, ces débris peuvent se décomposer et se changer en humus. L'humus est rempli d'éléments nutritifs et l'infiltration de l'eau permet aux éléments nutritifs de descendre au prochain horizon (A).



<p>Horizon A (ou horizon mixte)</p>	<p>Il est composé d'éléments minéraux et d'humus. L'horizon A est formé d'une couche composée d'un mélange d'humus et de particules des roches, ce qu'on nomme aussi «terre arable». Sa couleur est noire ou foncée (d'autant plus foncée que la teneur en matière organique est élevée dans cet horizon). Il est l'horizon le plus affecté par l'érosion et les transformations biologiques. Cette couche est essentielle pour le développement des végétaux car elle est remplie de matières organiques et de minéraux. C'est dans l'horizon A que l'on trouve le plus d'activité biologique (dont les microorganismes, bactéries et champignons du sol). Certains insectes, rongeurs et vers qui creusent la terre assurent l'aération de cette couche. C'est là qu'a lieu la décomposition de la litière et des racines, la libération des nutriments et la formation des acides organiques.</p>
<p>Horizon E</p>	<p>Cet horizon (avec E pour éluvial) peut apparaître dans les sols minéraux lorsque des matériaux comme la matière organique, l'argile, le fer et l'aluminium en ont été lessivés par percolation vers des couches plus profondes. Les horizons E sont en général plus clairs (mais pas toujours) et possèdent une texture plus grossière.</p>
<p>Horizon B (ou horizon d'accumulation)</p>	<p>C'est le sous-sol minéral contenant une ou plusieurs couches de couleur plus vive (ex: couleur rouge) que les horizons O et A. C'est un horizon intermédiaire qui apparaît dans les sols lessivés. Il est riche en éléments fins (argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium, composés humiques), arrêtant leur descente à son niveau lorsqu'ils rencontrent un obstacle mécanique lié à la <b>porosité</b> (frein à la <b>diffusion</b> lorsque la porosité devient plus fine).</p> <p>Les horizons B contiennent beaucoup moins de matière organique (d'où la différence de couleur); ils sont exploités par les racines et les animaux du sol qui utilisent l'eau, l'air et les nutriments qui y sont stockés.</p> <p>Il est le siège de processus physico-chimiques et <b>biochimiques</b> aboutissant à la destruction des <b>minéraux</b> du sol (altération minérale). La couleur brunâtre, jaunâtre ou rougeâtre provient des oxydes de fer issus de l'altération des minéraux, tandis que les tons grisâtres résultent d'une réaction chimique en milieu réducteur.</p>
<p>Horizon C</p>	<p>C'est un horizon composé de matériau meuble provenant du sous-sol. Il contient des morceaux de <b>roches fragmentées</b>, partiellement déformées et il y a un manque de matières organiques.</p>
<p>Horizon R</p>	<p>C'est la couche de la roche-mère (le sous-sol, un lit de roche) à partir de laquelle le sol s'est formé sous l'action des divers éléments et événements survenus avec le temps. La roche mère qui n'est pas altérée se nomme le «substratum rocheux». Il peut être sableux, argileux ou dur.</p>

### 1.1.3.3. Les principaux constituants minéraux du sol

#### Les éléments grossiers

Les éléments grossiers forment le **squelette du sol**. Quand ils constituent la part essentielle dans la composition du sol, ils donnent ce que l'on peut appeler des sols squelettiques (certains sols de montagne par exemple). Leurs rôles peuvent être résumés de la façon suivante :

- Ils constituent la réserve minérale du sol : leur altération chimique libère des éléments minéraux qui contribuent à l'alimentation des plantes (signalons cependant que les grains de quartz sont cependant quasi inaltérables chimiquement, et ne peuvent participer à l'alimentation des plantes),
- Ils augmentent la perméabilité du sol à l'eau et à l'air,
- Ils diminuent le volume de sol prospectable pour les plantes (par diminution de la proportion de la terre fine à la disposition des racines),
- Ils peuvent avoir une action sur la chaleur du sol, en tant que réservoir de chaleur (terrains calcaires par exemple),
- Ils peuvent participer à constituer une réserve d'eau : certaines roches poreuses (calcaires par exemple) peuvent retenir un peu d'eau.

#### Les sables grossiers

Leurs rôles peuvent être résumés de la façon suivante :

- Ils favorisent la pénétration de l'eau et de l'air : ils rendent le sol perméable,
- Ils retiennent peu l'eau : le sol est filtrant,
- Ils facilitent les échanges de température : le sol se réchauffe vite au printemps,
- Ils ne peuvent s'agglomérer en mottes : le sol est léger (et peut donc être assez sensible à l'érosion), et facilement pénétrable par les racines.

#### Les limons fins et sables fins

Ils rendent le sol « battant » : le sol a tendance à **se tasser en surface** sous l'effet des pluies et à former des croûtes (glaçage en surface). Ils ont tendance à retenir l'eau en s'opposant à son infiltration en profondeur : le sol est imperméable en surface, asphyxiant pour les racines.

#### Les argiles

Les minéraux argileux peuvent être présents sous divers états : dispersés, agrégés et floculés qui sont liés à la nature et à la concentration des cations (force ionique), notamment du sodium ( $\text{Na}^+$ ) et du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ). En s'associant avec la matière organique, les fines particules d'argiles participent à la **formation de colloïdes mixtes** (le **complexe argilo-humique ou C.A.H**) responsables des **réactions d'adsorption** (ou de **fixation en surface**) spécifiques ou non spécifiques, permettant la fixation de cations, d'anions (voire de molécules chargées, comme les résidus de pesticides et autres contaminants des sols). Nous développerons ce point en détail plus loin (au point 3).



Figure 2 – Image d'un sol battant et compacté après la pluie (source : site de l'agriculture de conservation ([www.agriculture-de-conservation.com](http://www.agriculture-de-conservation.com)))

#### 1.1.3.4. Les principaux constituants organiques du sol

##### Origine de l'humus

La transformation, par décomposition (sous l'action de divers « agents »), des débris organiques (qu'ils soient d'origine végétale ou animale) abandonnés sur le sol (ex : chute naturelle, sénescence ou résidus d'une culture) ou enfouis dans le sol (par l'homme et/ou par des animaux) conduit à l'apparition de **matières humiques**.

La mort des êtres vivants, leurs déchets et sécrétions apportent au sol sa matière organique, qualifiée de « fraîche » avant qu'elle ne se transforme en humus (Gobat *et al.*, 2003). Les substances végétales interviennent pour la presque totalité (99%) dans l'élaboration de l'humus.

L'ensemble de la matière organique des sols comporte donc d'abord de **produits frais** ou peu évolués (peu transformés). Les **matières organiques fraîches** génératrices de l'humus se composent de :

- sucres, d'amidons et d'autres hydrates de carbone solubles dans l'eau ;
- hémicelluloses ;
- cellulose, polysaccharide provenant de la condensation de molécules de glucose ;
- lignines, qui sont des produits de condensation de polyphénols ;
- tanins ;
- graisses, de cires, d'huiles,...
- protéines et dérivés ;
- constituants minéraux (cendres) : P, S, K, Ca,...

La matière organique des sols comporte ensuite des **produits évolués** : ce sont les **substances humiques**. Avec la matière organique fraîche, elles constituent l'humus au sens strict du terme.

Les **substances humiques** sont des macromolécules organiques ou «**colloïdes**». C'est-à-dire **des** particules extrêmement fines qui, dans la solution aqueuse du sol, ne forment pas une solution vraie mais une suspension (suspension colloïdale). Ces colloïdes sont très réactionnels et constitués principalement de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'azote, occasionnellement de soufre et de phosphore. Les substances humiques sont ainsi classées sur la base de leur taille moléculaire mais aussi de leur solubilité en milieu aqueux. On distingue les acides humiques et les acides fulviques :

- Les **acides humiques** constituent une quantité importante du carbone organique dissous dans la solution du sol. Les acides humiques constituent une des fractions les plus importantes de l'humus. Ils sont **peu mobiles**, mais sont capables de se lier plus ou moins fortement selon leur type avec d'autres corps présents dans le sol et **en particulier avec l'argile**. Dans ce cas, on parle d'acides humiques gris. **Le complexe formé avec l'argile ou complexe argilo-humique est très stable**.

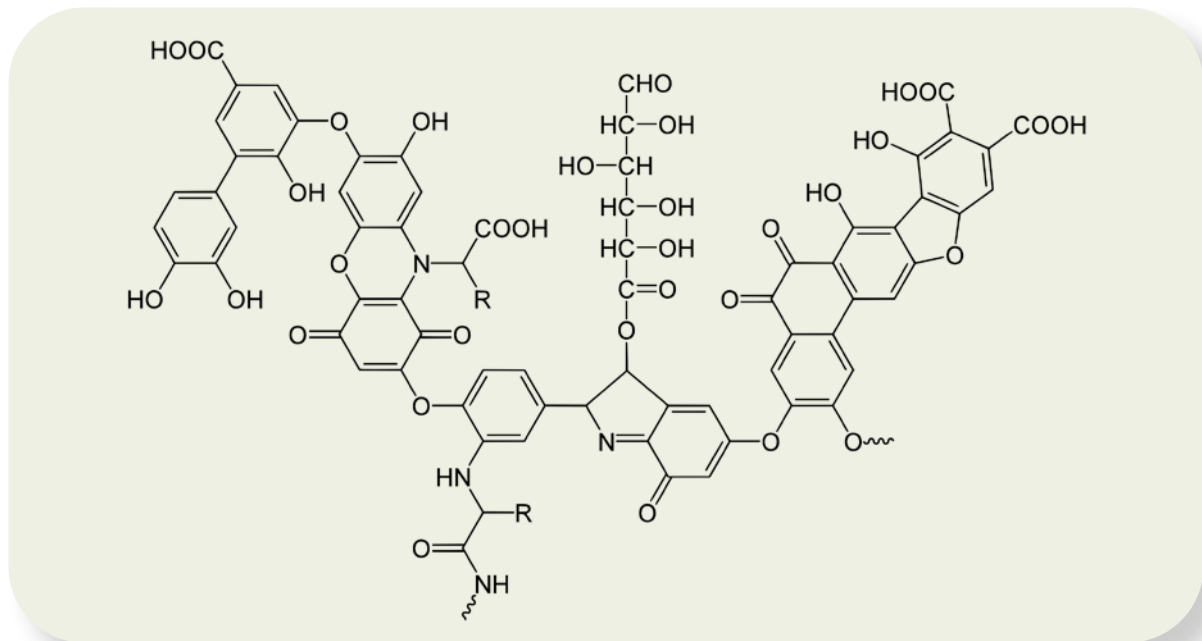


Figure 3 – Représentation schématique d'un acide humique

- Les **acides fulviques**, plus mobiles, constituent la majeure partie du carbone organique dissous des eaux naturelles. Très vite entraînés par les eaux d'infiltration, qu'ils chargent de l'argile et du fer auxquels ils sont liés. Ce sont, par ce mécanisme, les principaux agents du lessivage du fer. Ils ont la capacité de chélater<sup>5</sup> plusieurs minéraux du sol et de **favoriser leur absorption par les plantes**.

5

La chélation est un processus physico-chimique au cours duquel est formé un complexe, le chélate, entre un ligand, dit chélateur (ou chélatant), et un cation complexé, dit chélaté.



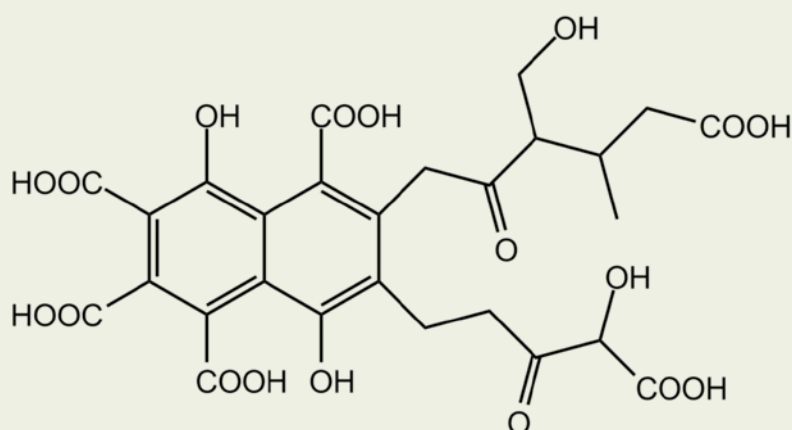


Figure 4 – Représentation schématique d'un acide fulvique

Ces substances humiques forment des classes de composés relativement homogènes malgré la grande diversité du matériel dont elles proviennent.

L'humus est l'ensemble de ces matières et substances organiques ; c'est le produit final issu de leur décomposition et transformation sous l'action de nombreux agents biologiques présents dans le sol (la biomasse composée de bactéries, champignons vivants, crustacés, insectes, nématodes, lombrics....).

L'humus est composé de molécules assurant des **rôles physiques** et **d'échange** dans le sol. Il participe très peu aux transferts d'azote. Il représente environ 60 à 80% des matières organiques totales. L'humus stable représente de 15 à 30% de l'humus total, avec des molécules organiques à faible durée de vie (réserve en nutriments). L'humus se trouve **dans la couche superficielle du sol** (surtout dans les horizons superficiels, O et A), ce qui explique sa vulnérabilité.

### Facteurs susceptibles d'influer sur la vitesse et qualité de la décomposition

La vitesse de formation de l'humus et de la minéralisation dans le sol dépend d'un certain nombre de facteurs. Sous **un climat chaud, les micro-organismes sont plus actifs** et la matière organique se décompose plus rapidement. Le degré d'acidité du sol ainsi que la composition de la matière organique, l'humidité et la disponibilité de l'oxygène ont également une grande influence sur la vitesse de décomposition.

On distingue **trois types de facteurs** susceptibles d'influer sur la vitesse et qualité de la décomposition et donc sur la formation de l'humus :

#### 1. Des facteurs environnementaux

- aération
- température
- humidité
- pH du sol ou du substrat
- présence éventuelle d'inhibiteurs freinant le métabolisme des décomposeurs (métaux lourds, biocides, etc.)

## 2. Des facteurs liés la qualité de la matière organique introduite dans le système

- taille et forme des résidus organiques
- **rapport carbone (C) sur azote(N)** des résidus organiques ou du sol complet : le rapport C/N 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. Le **rapport C/N est très élevé pour la matière végétale fraîche** (50 à 150 pour la paille) et diminue tout au long de sa décomposition en se stabilisant autour de **10 pour l'humus**. Il est couramment admis que, plus le rapport C/N d'un produit est élevé, plus il se décompose lentement dans le sol mais **plus l'humus obtenu est stable**. Cet indicateur est utilisé pour préciser l'utilisation d'un produit organique inconnu. Pour que le compostage se fasse dans des conditions optimales, le rapport C/N doit être situé entre 15 et 30. En effet, si le mélange à composter est trop faible en azote, il ne chauffera pas (pas de dégradation). Si la proportion d'azote est trop élevée, le compost peut surchauffer et tuer les micro-organismes du compost. Il faudra donc veiller à équilibrer les apports.

C/N < 15	Production d'azote, la vitesse de décomposition s'accroît; elle est à son maximum pour un rapport C/N = 10
15 < C/N < 20	Besoin en azote couvert pour permettre une bonne décomposition de la matière carbonée,
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.

## 3. Des facteurs liés à la composition de la matière organique. Cette composition va influencer la vitesse de décomposition de la matière organique. Il varie selon la proportion des composés suivants présentés dans un ordre correspondant à la décomposition de la plus rapide à la plus lente :

- sucres, amidons et protéines simples
- hémicellulose
- cellulose
- graisses, cires, huiles, résines
- lignine, composés phénoliques, chitine, etc.

## Propriétés de l'humus

Dans le compartiment de la biosphère qu'est le sol, l'humus en est la partie biologiquement la plus active. L'humus, parfois nommé terre végétale, désigne la couche supérieure du sol créée et entretenue par la décomposition de la matière organique, essentiellement par l'action combinée des animaux, des bactéries et des champignons du sol. L'humus est une matière souple et aérée, qui absorbe et retient bien l'eau. Nous détaillerons dans plusieurs chapitres quels sont les organismes qui vivent dans le sol et leur rôle sur la structure et la fertilité du sol.

L'humus possède les propriétés suivantes (CTA, Agrodok N°8) :

- il améliore **la structure du sol** ;
- il améliore **la résistance du sol à l'action érosive** des pluies ou du vent ;
- il peut **retenir l'eau** et la libérer lentement aux plantes (capacité d'emmagasinement de l'eau) pendant une période plus longue ;
- il peut retenir des substances nutritives du sol et les libérer lentement aux plantes pendant une période plus longue ;
- il contient les substances nutritives importantes : azote (N), phosphore (P) et potassium (K), qui viendront à la disposition des plantes après décomposition. La décomposition lente et naturelle d'un humus libère directement aux racines des plantes de l'azote, du phosphore et tous les éléments nutritifs indispensables à la croissance des végétaux. La matière première de l'humus est la litière, à laquelle s'ajoutent des composants d'origine animale déposés sur l'horizon superficiel ou remontés par les animaux fousseurs, dont les vers de terre.

L'humus joue un rôle capital à la fois dans la fertilité et dans l'économie en eau des sols. Sa formation et sa conservation dans le sol sont donc prioritaires pour maintenir la fertilité de façon durable.



## Les agents de l'humification

La flore du sol (**bactéries, champignons**) et la **pédofaune** (cloportes, fourmis, collemboles, vers de terre, limaces, myriapodes, etc.), fragmentent et transforment les résidus végétaux et animaux. Agents de l'humification, ils interviennent tour à tour dans un réseau trophique complexe et encore peu connu jusqu'à nos jours. Nous reviendrons plus loin (point 3) sur les propriétés biologiques du sol et le rôle crucial des nombreux organismes qui vivent dans et sur le sol.

Ce sont principalement des micro-organismes qui décomposent directement une partie de l'humus en dioxyde de carbone, en eau et en substances nutritives pour la plante. **Ce processus s'appelle la minéralisation**. La minéralisation libère des substances nutritives qui peuvent être directement assimilées par les racines des plantes.



- **Champignons** : ils résistent mieux que les bactéries à la sécheresse et à l'acidité, et constituent la microflore quasi exclusive de certains mors secs et acides. Mais à la différence des bactéries, ils sont toujours hétérotrophes et aérobies ; ils ne prolifèrent pas dans les milieux mal aérés. Leur rôle dans le sol est considérable et très varié : il s'exerce surtout dans la **phase de décomposition** de la matière organique fraîche, qui précède l'humification : la plupart sont **aptés à décomposer la cellulose**, certains sont capables de décomposer des composés phénoliques plus résistants tels que la lignine et les tannins. Certains champignons sont **associés aux racines des plantes** et des arbres, en formant des mycorhizes, à vie symbiotique, qui facilitent la croissance et la nutrition des espèces concernées.
- **Actinomycètes** : ce sont des organismes du sol intermédiaires entre les bactéries et les champignons. Les actinomycètes jouent un rôle important dans la **décomposition des litières** d'une part, dans l'humification d'autre part. Ils semblent jouer un grand rôle dans la transformation de certains composés organiques et minéraux du sol, mais ce rôle est encore mal connu : ils seraient susceptibles de décomposer les composés de la matière organique fraîche tels que la lignine et certains tannins, et d'élaborer certains acides humiques. Les actinomycètes ont aussi d'autres fonctions : certaines espèces, en particulier *Frankia alni*, forment des nodosités avec les racines des aulnes, et sont à l'origine d'une fixation active d'azote atmosphérique qui explique le rôle améliorant de cette espèce.
- **La faune du sol**  
Elle est divisée suivant la taille des organismes, en micro-, méso- et macrofaune.
  - **Microfaune** (moins de 0,2 mm) : constituée essentiellement de protozoaires et de nématodes : ils sont abondants dans les milieux très humides et s'attaquent à la flore bactérienne et aux actinomycètes.
  - **Mésafaune** (0,2 mm à 2-4 mm) : acariens et collemboles qui caractérisent surtout les milieux acides. On y trouve aussi certains nématodes.
  - **Macrofaune** (taille supérieure à 2-4 mm) : on y trouve :
    - les **lombrics** (vers de terre) qui jouent un rôle essentiel dans la structuration des horizons A des mull actifs et peu acides,
    - les **enchytraéides** (une autre classe de vers) qui caractérisent surtout les milieux acides, les larves d'insectes (diptères, coléoptères). Ils sont plus abondants dans les milieux acides et secs.



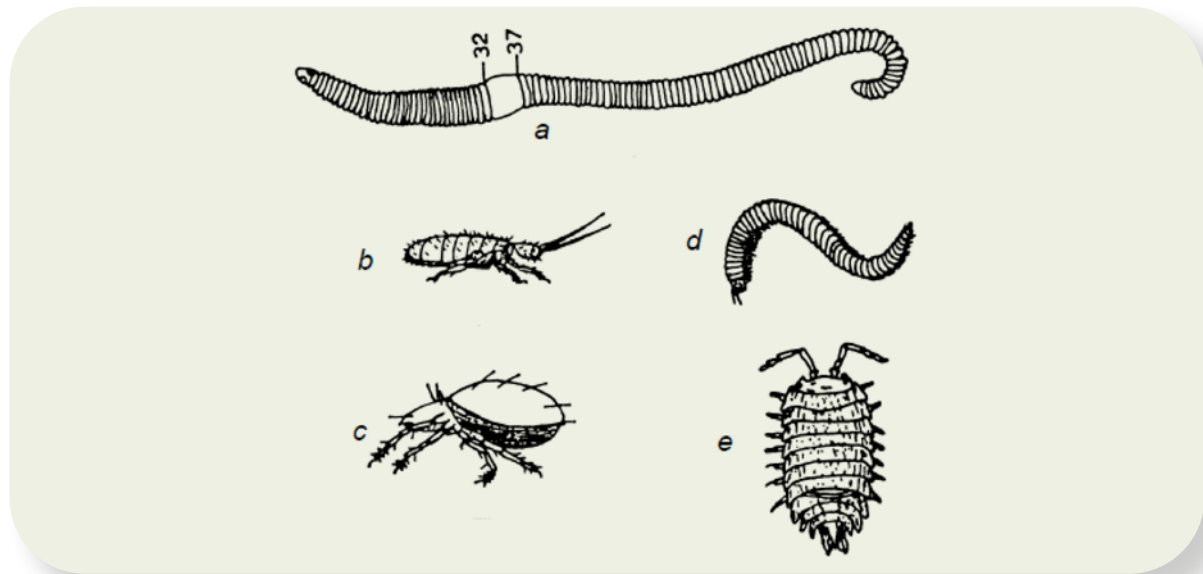


Figure 6 – Organismes les plus fréquents dans le sol  
(a : lombric ; b : collembole ; c : acarion ; d : iule (mille-pattes) ; e : cloporte)

La structure du sol dépend de l'assemblage des particules minérales et organiques en agrégats qui eux-mêmes peuvent former des mottes. Les **bâtisseurs** de cette structure sont les «ingénieurs du sol» (vers de terre, termites, etc.), membres de la macrofaune qui aèrent, stabilisent et permettent la bonne circulation de l'eau dans les sols. Complémentaires, **les fourmis, les termites et les vers de terre brassent la matière organique et façonnent le sol** chacun à leur manière en creusant, grattant, mélangeant, retournant ou labourant la terre. Ils créent de nombreux pores, galeries et agrégats qui permettent une meilleure oxygénation du sol et entretiennent ses propriétés hydrauliques (infiltration et rétention de l'eau...).



Figure 7- Exemple de termitière dans la région de l'Atacora (Bénin) (Source : CNRS, Sagascience)

Une **termitière**, composée de sol, de fumier et de salive de termites peut prendre quatre à cinq ans à construire, et elle évolue continuellement avec le temps. Comme les fourmis, les termites sont des animaux sociaux qui érigent en groupe ces structures impressionnantes, de parfois plus de cinq mètres de haut. Bien que le monticule paraisse solide, il est en fait poreux pour permettre à l'air de circuler dans les tunnels et les chambres. L'air entre dans le monticule par de minuscules trous et oxygène la structure. À mesure qu'il se réchauffe, l'air monte et quitte le monticule par la cheminée centrale. Ce système de ventilation unique continue à maintenir une température constante à l'intérieur, là où résident les termites, où sont élevées les larves, où la nourriture est stockée et où se trouve même une ferme de champignons symbiotiques cultivés pour la nourriture. Les termitières, en favorisant la pénétration de l'eau de pluie, créent des poches d'humidité dans les terres arides. La végétation parvient à s'y maintenir plus longtemps, et à reconquérir les zones alentour au retour de la pluie. Selon des chercheurs de l'université américaine de Princeton, **les termites sont des pivots de la résistance des écosystèmes à la désertification**.

Le travail des **vers de terre** est tout aussi gigantesque : ils peuvent remuer 1000 tonnes de terre par an par hectare de savane africaine, et 500 à 600 tonnes en région tempérée, ce qui augmente considérablement la quantité d'eau du sol !

En parallèle et en interaction avec cette macrofaune, le travail des microorganismes, de la petite faune, des filaments de champignons et des racines, qui déplacent et organisent les particules minérales (argiles, limons, sables) et organiques est également considérable (CNRS & FRB, 2017).

#### 1.1.3.5. *Les couleurs du sol*

La première chose qu'on observe en regardant le sol c'est **sa couleur**. Les trois principaux agents colorants des sols sont :

- **les matières organiques** : colorations noires ou brunes ;
- **le fer**, par ses oxydes au sens large : colorations rouges, violacées, rouille ou brunes en milieux oxydants, bleuâtres ou verdâtres en milieu réducteur ;
- **le calcaire** : coloration blanche.

Des **couleurs foncées en surface sont une indication de la fertilité** du sol. Les sols noirs sont en général plus fertiles que les sols qui ont une couleur moins foncée, parce qu'ils contiennent un taux plus élevé de matière organique. La couleur de la matière organique est plus foncée (brun à noir) que celle des oxydes de fer (jaune, rouge, brun). Cette couleur domine généralement dans les horizons de surface, alors que pour les horizons situés plus bas, les couleurs des oxydes de fer (rouge) et parfois des oxydes de manganèse (très noir) dominant.

Un certain nombre de sols présentent une couleur directement héritée de la roche dont ils sont issus. Pour d'autres, au contraire, la couleur est due aux constituants qui se sont individualisés, accumulés ou concentrés au cours de la pédogenèse (complexe d'altération et matières organiques).

Des **changements de couleur** peuvent aussi donner une indication du régime hydrique du sol parce que les couleurs des oxydes de fer en conditions bien sèches et aérées sont différentes de celles en conditions inondées.

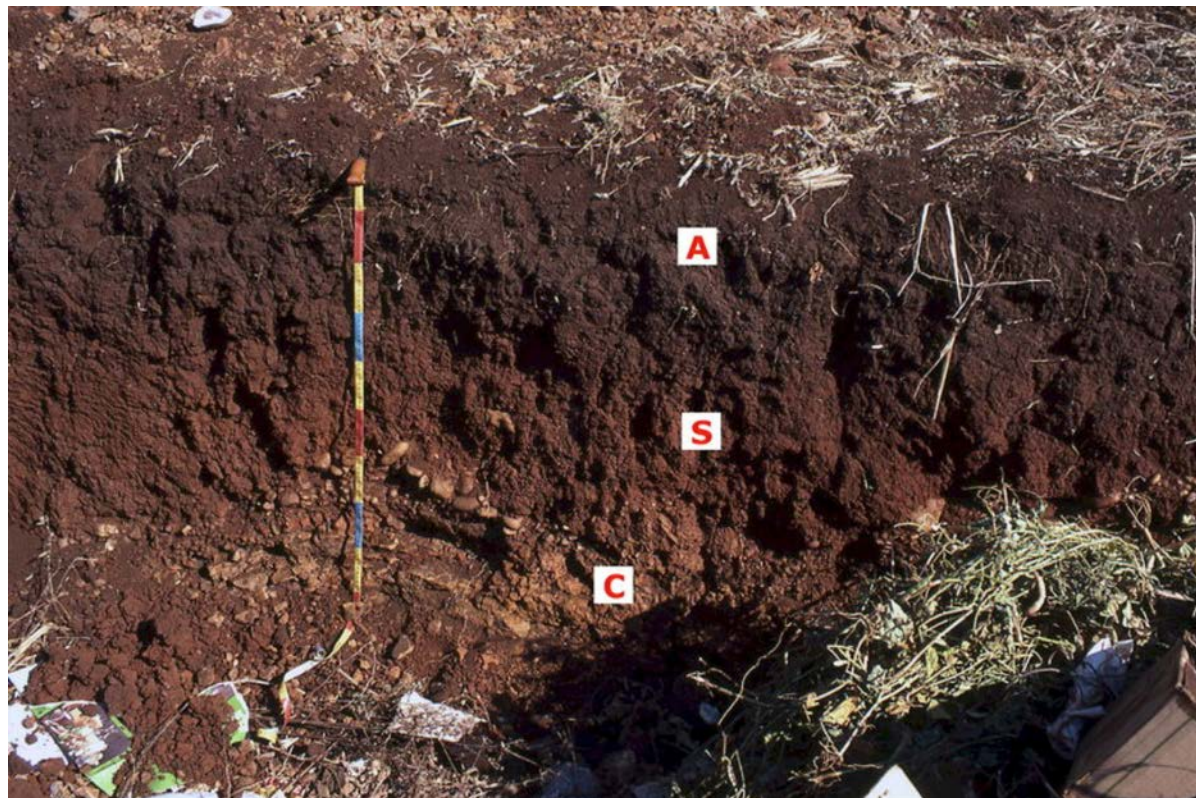


Figure 8 – Exemple-type d'un sol coloré, avec 3 horizons distinguables (WRB : Phaeozem, sol à incorporation d'humus foncé; hauteur de la coupe: 90 cm) (Source : photothèque de l'AFES)<sup>6</sup>

La figure 8 montre un exemple de sol fersiallitique moyennement différencié. Ce type de sol est généré par un climat tropical subhumide. La roche-mère (non visible sur la photo) est du basalte. On distingue les horizons suivants :

- un horizon A, organo-minéral, de couleur sombre
- sur un horizon S, d'altération à structure pédologique, rouge (bien drainé), à structure anguleuse (polyédrique) bien développée. La texture est argileuse (présence probable d'argile gonflante)
- sur un horizon C, résultant de l'altération de la roche-mère.

<sup>6</sup> Des photos de divers types de sol disponibles sur le site de l'AFES.



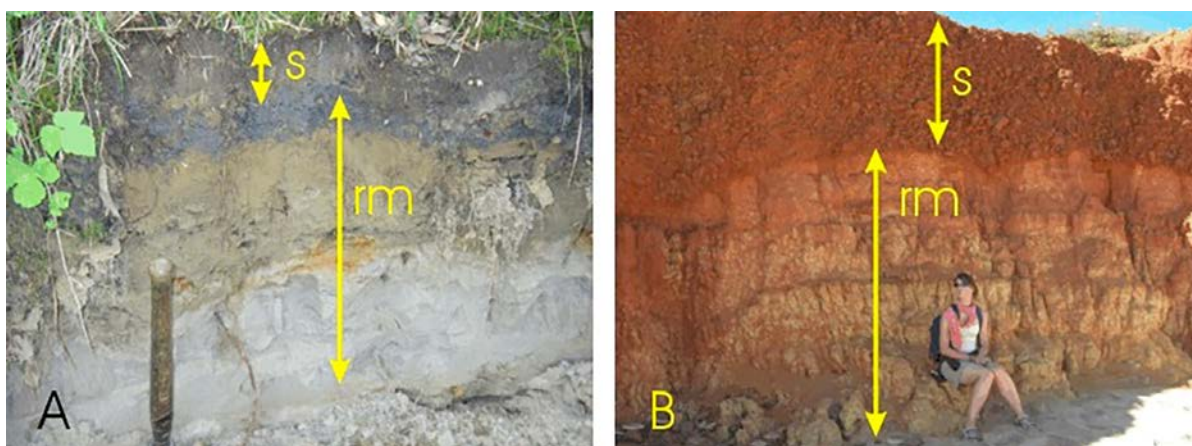


Figure 9 - Exemples de la couleur de deux profils d'altération.  
 Dans ces exemples, les horizons O et A ont disparu ;  
 l'horizon S est un horizon d'altération ;  
 rm est la roche-mère (roche non altérée située à la base du profil.  
 Elle est qualifiée de roche-mère car elle est bien à l'origine du sol).  
 (Source : Université de Liège).

Dans la figure 9 :

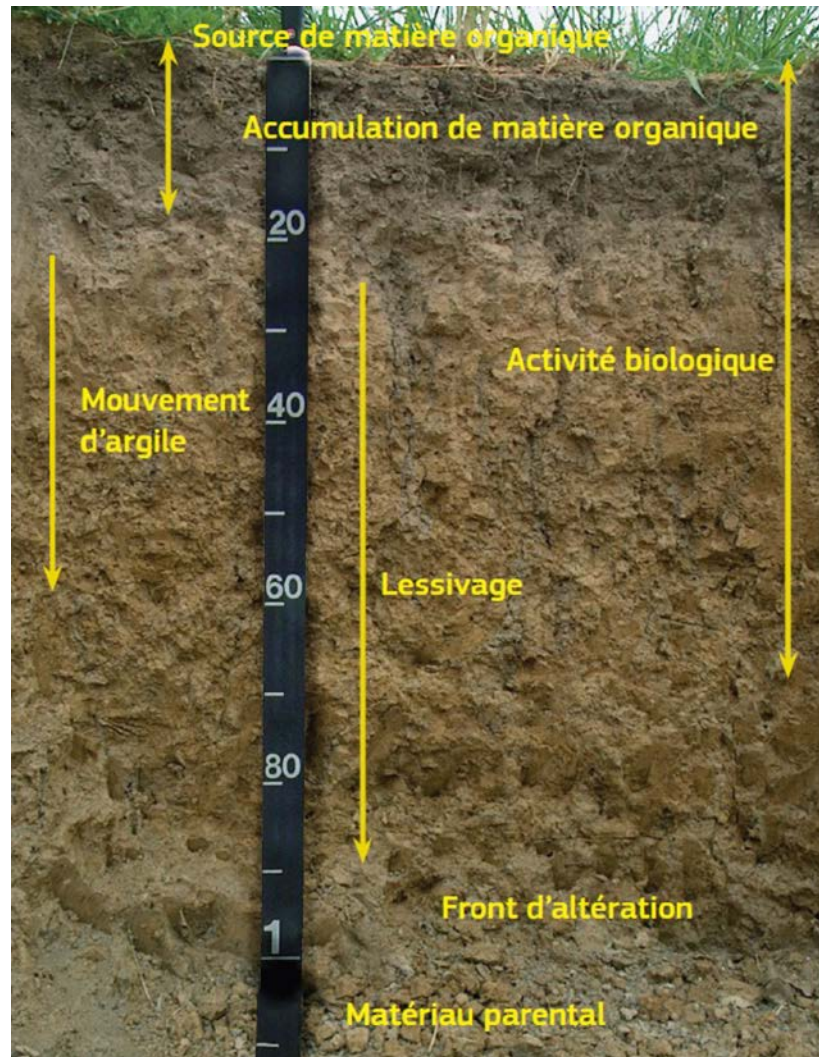
- Le profil A est un sol de climat tempéré (Habay, Belgique). C'est un sol très peu épais qui surmonte des sables et argiles, au-dessus de la roche mère.
- Le profil B est un sol de climat tropical. Un horizon d'altération au-dessus de la roche-mère. Ici, la coloration rouge de l'horizon S est due à l'accumulation des oxydes-hydroxydes de fer.

## 1.2. LA FORMATION DES SOLS ET LES TYPES DE SOLS

### 1.2.1. La formation des sols (pédogénèse)

#### 1.2.1.1. Les grands processus mis en œuvre dans la pédogénèse

Le sol met **très longtemps à se constituer** (plusieurs milliers d'années). Dans certaines conditions, la roche-mère, élément minéral est altérée par l'air et l'eau. Cela permet l'installation de premières plantes pionnières. Ensuite, la matière organique provenant de plantes et d'animaux morts forme en surface **une litière**. Décomposée par la faune du sol, elle est **transformée en humus**. Puis mélangé à des éléments minéraux, le sol devient cultivable, c'est ce que l'on appelle de la **terre arable**. Il est important de comprendre que les processus de formation des sols peuvent évoluer et varier avec la topographie et le temps, en réponse à des facteurs tels que la variabilité climatique et l'utilisation des terres pour les activités humaines (ex : différence entre pâturage et cultures vivrières).



**Figure 10** - Schéma des principaux processus de formation des sols. La couleur foncée de la partie supérieure de ce profil de sol indique que des quantités significatives de matière organique se sont accumulées dans la couche arable par décomposition de la végétation et des racines. La couleur plus claire entre 20 et 40 cm est due à une combinaison de lessivage du fer mobile et de perte d'argiles par percolation des eaux pluviales. Dans le sous-sol, le fer a enrobé les particules du sol d'un film fin et rougeâtre. La roche-mère à partir de laquelle le sol s'est développé et le front d'altération sont clairement visibles à la base du profil. Les processus biologiques sont en général plus actifs dans la couche arable (Source : Atlas africain des sols, page 24).

La formation d'un sol met en œuvre plusieurs processus, notamment (voir aussi figure 10, extraite de l'Atlas africain des sols) :

1. La désagrégation et l'altération d'une roche-mère (altération)
2. L'enrichissement du sol par la matière organique (accumulation et incorporation)
3. La migration de substances et de particules dans le profil du sol (lixiviation des éléments solubles et mouvements de particules).



## La désagrégation et l'altération d'une roche-mère

Tout sol provient de la décomposition d'une roche, que l'on appelle pour cette raison une « roche-mère ». Il peut s'agir aussi bien d'une **roche dure** (les roches éruptives et les calcaires durs) que d'une **roche tendre** (les calcaires tendres, les marnes et les argiles compactes, les sables, les éboulis, les lœss<sup>7</sup>...). Tous les sédiments sont issus de la roche solide suite à un processus appelé **altération**. L'altération se définit comme la **destruction mécanique de la structure rocheuse** qui facilite ensuite les modifications chimiques des minéraux qui la composent.

La météorisation<sup>8</sup> physique fragmente le matériau sans altérer sa nature et les roches sont progressivement réduites en morceaux de plus en plus fins. En même temps, l'eau et l'énergie qui sont présentes dans le sol provoquent des réactions chimiques qui altèrent les minéraux initiaux (primaires) et produisent de nouveaux minéraux (secondaires). Ainsi, le matériau d'origine est progressivement fragmenté et altéré pour aboutir à un matériau qui est un mélange des constituants initiaux et de nouveaux minéraux, notamment des argiles, qui vont jouer un rôle très important dans la fertilité du sol. Le matériau d'origine peut être une roche (roche mère) ou un matériau non-consolidé (dépôt d'alluvions, colluvions, lœss, dépôts glaciaires).

L'intensité de la désagrégation **physique** et l'altération **chimique** dépendent du **climat, véritable moteur de la formation des sols**. L'altération des roches qui conduit à la formation des sols est **plus complète et plus rapide du fait de la température élevée dans la plupart des régions des pays ACP**. L'indice d'altération est environ **trois fois plus élevé en climat tropical** qu'en climat tempéré, ce qui explique en partie la forte épaisseur des altérations en milieu tropical.

**L'eau est le facteur clé de l'altération chimique**. Comme l'eau de pluie est légèrement acide (pH d'environ 5,6 dans les environnements non pollués) les minéraux naturellement solubles (ex : le gypse, craie,...) ou instables (ex : feldspath, mica,...), vont se dissoudre lentement pour former des produits secondaires comme des minéraux argileux (ex : la kaolinite, l'illite, la vermiculite,...), des (hydr)oxydes de fer et d'aluminium, des carbonates et des nutriments tels que le calcium et le potassium. Une série de réactions chimiques (oxydation et réduction) provoquent la libération de divers cations dans le sol.

A ces deux formes d'altération, s'ajoute **l'effet des activités des organismes vivants**. Ainsi les racines se développent dans les fissures et font éclater les roches ; les bactéries et champignons transforment la matière organique ; tandis que des animaux comme les vers de terre, les fourmis ou les termites creusent des galeries et mélangent ou retournent le sol.

7 Roche sédimentaire détritique meuble, très poreuse et très perméable à l'eau ; ses particules font moins de 50 microns de diamètre. Le loess est un limon très fertile issu de l'érosion éolienne.

8 La météorisation rassemble l'ensemble des processus mécaniques, physico-chimiques ou biologiques de réduction élémentaire des roches et des minéraux à la surface de la Terre.

Le résultat de ces désagrégations et altérations est d'abord **un mélange** :

- de minéraux plus ou moins désagrégés mais encore non altérés :
  - blocs de pierre et graviers,
  - grains de sables et poudre de limon,
- d'une sorte de pâte, le « complexe d'altération », provenant de l'altération chimique des minéraux :
  - pâte d'argile, colorées par des oxydes de fer,
  - sels de calcium, de magnésium, de potassium, de sodium...sous des formes plus ou moins solubles.

### L'enrichissement du sol par la matière organique

Le sol ne prend naissance que **lorsqu'à ces constituants minéraux s'ajoutent des constituants organiques**, c'est-à-dire provenant d'organismes animaux et végétaux. À partir de ce moment (qui intervient d'ailleurs dès le début de l'altération), les débris organiques (surtout végétaux) aboutissent à la formation des substances noires, plus ou moins pâteuses, réunies sous le nom d'« humus ». Non seulement ces substances influenceront sur la fertilité du sol, mais encore elles vont, en association avec les agents climatiques, jouer un rôle primordiale dans l'évolution ultérieure du sol.

L'influence des températures élevées s'exerce aussi sur **la dynamique de la matière organique dont la minéralisation est accélérée** ; ce qui conduit à un appauvrissement rapide des sols en humus lorsque la végétation naturelle est remplacée par des cultures qui ne permettent pas une restitution suffisante de résidus de récolte.

### Les mouvements de migration, vers le bas et vers le haut

Dans ce sol, encore jeune et qui continue à s'approfondir, **le mouvement de l'eau vers le bas et vers le haut** vont faire subir aux éléments colloïdaux (argile, humus) et solubles (sels de calcium, oxydes de fer,...) des déplacements appelés « migrations » :

- Les déplacements vers le bas dominant sous climat à forte pluviométrie et consistent **en lixiviation<sup>9</sup> d'éléments et en lessivage de particules** (ex : argiles). Le taux de percolation dépend du climat mais aussi de la texture et de la structure du sol, de la porosité et de la pente du terrain – dans les régions sèches, même les plus mobiles des composés (chlorure de sodium par exemple) tendent à rester dans la couche superficielle et entraînent la formation de sols salins.
- Les déplacements vers le haut, ou **remontées** (ex : de sels dissous), dominant au contraire sous climat à forte évaporation. Ils sont responsables du phénomène de « **salinisation** » des sols, extrêmement préjudiciable à la fertilité des sols.

<sup>9</sup> En agriculture, la lixiviation désigne la perte de nutriments hydrosolubles du sol, qui sont dissous et entraînés par les eaux d'infiltration suite aux pluies ou à l'irrigation. Certains parlent aussi de « lessivage » dans ce cas.

Lorsque l'eau traverse les sols, **elle dissout les sels solubles** (chlorures, nitrates, sulfates et carbonates) **et les emporte**, ainsi que les solutés organiques et chimiques, vers des sections plus profondes du sol. Sous des climats plus secs, ces sels peuvent être re-précipités, par exemple, en un horizon riche en carbonate de calcium dans le sous-sol. Dans les régions plus humides, des quantités importantes de matières peuvent être totalement retirées du sol par lixiviation. Ces migrations sont ainsi à l'origine de la formation d'«**horizon lessivés**» ou appauvris et d'«**horizons d'accumulation**» d'argile, d'humus ou d'oxyde de fer (Soltner, 1990).

L'intensité de ces migrations dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels la **pluviométrie** mais aussi la capacité du complexe argilo-humique (C.A.H) à retenir les éléments (pouvoir absorbant ou capacité de rétention). Une des particularités des climats tropicaux est la **forte intensité de pluies** et, dans les zones à climat de mousson, leur concentration sur une courte période. Dans les régions pluvieuses, lorsque l'infiltration et le drainage profond sont importants, les risques de lixiviation des éléments nutritifs sont considérables. En zone cultivée, ce processus est aggravé lorsque les plantes cultivées ont un enracinement peu profond, incapable de remonter en surface les bases entraînées en profondeur par le drainage naturel.

Le phénomène de dissolution/migration est un important facteur pour la fertilité des sols. Tant que du carbonate de calcium est présent, le pH du sol est supérieur à 7 (voir point 3). Lorsque le carbonate de calcium est dissout et entraîné en profondeur, le pH chute et le calcium, le magnésium et le sodium sont libérés des surfaces des minéraux argileux et de l'humus pour être remplacés par de l'hydrogène et de l'aluminium : **le sol devient acide**. Or, les sols trop acides ne sont pas bien adaptés aux cultures (à un pH < 5,5 des cations aluminium toxiques pour les végétaux sont libérés dans la solution du sol). Il est alors nécessaire d'apporter du carbonate de calcium (**chaulage**) pour remonter le pH à un niveau qui convient à la culture (voir chapitre 5).



### 1.2.1.2. Six éléments interviennent fondamentalement dans la formation du sol

Selon les pédologues, 6 éléments interviennent dans la formation des sols :

- La composition de la roche-mère (le matériau parental qui va s'altérer)
- Les conditions climatiques (le climat est le moteur du changement)
- Les organismes vivants : végétation et autres (micro)organismes
- Le temps (la durée des évènements)
- La topographie
- Les interventions humaines (pratiques culturales, mais aussi incendies, déforestation, etc.)

Les 4 premiers éléments sont les plus importants à décrire. Dans les chapitres suivants, nous reviendrons en détails sur l'influence de certaines pratiques culturales et des activités humaines sur le sol (dégradation, salinisation, compaction, pollution).

## Le matériau d'origine

La nature du matériau parental (à savoir sa composition, mais aussi si c'est une roche meuble ou une roche dure) peut avoir une profonde influence sur les caractéristiques du sol. Par exemple, la texture des sols sableux est principalement déterminée par les matériaux parentaux et elle-même contrôle le mouvement de l'eau dans le sol. La minéralogie du matériau parental se reflète dans le sol et peut définir le processus d'altération et contrôler la composition de la végétation naturelle. Par exemple, les sols carbonatés sont en général issus de roches calcaires (calcaire, craie) ou de sédiments issus de dépôts de ce genre (Atlas africain des sols).

C'est l'eau qui est le principal agent d'altération du matériau d'origine, mais beaucoup de facteurs interviennent. L'altération de la roche-mère varie avec : la température (régie par le climat, l'exposition et l'altitude), le taux de percolation (régé par la texture, le relief et le climat), la présence d'oxygène (régie par la texture et le climat), la composition minéralogique du matériau parental (par exemple, le quartz est beaucoup plus stable que l'olivine), et la production d'acides organiques. Les minéraux des sols fortement altérés des régions humides/tropicales sont très stables (ex : kaolinite).

## Le climat

La formation des sols dépend énormément du climat car les niveaux de température et d'humidité affectent les processus d'altération. Les sols pourront être lessivés ou saturés en eau lorsque les précipitations dépassent l'évapotranspiration. Lorsque c'est l'inverse, des sels peuvent remonter à la surface. L'altération chimique sera très active dans les zones où les températures et les taux d'humidité sont élevés tandis que l'altération physique dominera dans les régions désertiques chaudes et sèches.

Le climat a aussi une influence évidente sur les organismes vivants bien que, parallèlement, le (micro)climat observé à la surface du sol puisse être très différent du climat régional. Ce microclimat peut lui-même être soumis à la topographie qui, elle-même, est le fruit de l'interaction entre la géologie sous-jacente (dans la plupart des cas, le matériau parental) et le climat local.

Dans les pays relativement chauds où la température ne descend jamais en dessous de zéro, la météorisation physique (c'est-à-dire la fragmentation de la roche-mère sans altération chimique) est beaucoup moins importante (pas de gelées de l'eau qui a pénétré dans les anfractuosités de la roche).


L'absorption de l'eau à la surface de certains types de roches fait gonfler les minéraux argileux, le dessèchement ensuite les fait se rétracter... C'est donc **un processus de gonflement et de rétraction qui fragmente la roche**. Ceci est très commun dans les marnes<sup>10</sup> où l'effet est accentué par la dissolution de la calcite présente dans la roche.



10 La marne est une roche sédimentaire, mélange de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) et d'argile dans des proportions à peu près équivalentes variant de 35% à 65%. Au-delà de 65% de calcaire, il s'agit d'un calcaire argileux, tandis qu'en deçà de 35% de calcaire, on parle d'argile calcaire.

Les grands types de sols se répartissent à l'échelle mondiale en fonction de deux facteurs climatiques (voir tableau 2) :

- La **température moyenne** de la région
- L'**humidité générale du climat** dans la région

**Tableau 2 :** Répartition des types de sol en fonction des conditions climatiques, avec une température moyenne de plus en plus élevée. À noter que nous ne considérerons pas ici le climat boréal et les sols particuliers qui se forment sous ce climat comme les chernozem ou les podzols par exemple).

Climat	Gradient d'humidité croissante 			
Tempéré	<i>Sols bruns</i>	<i>Sols châtains</i>	<i>Brunizem</i>	<i>Sols brunifiés</i>
Subtropical	<i>Sols marron</i>	<i>Sols fersiallitiques</i>	<i>Sols ferrugineux</i>	
Tropical	<i>Sols brun-rouge tropicaux</i>		<i>Sols ferrallitiques</i>	

 Accumulation du Ca<sup>++</sup>
 Pertes croissantes en Ca<sup>++</sup>

(Source : tableau adapté d'après Duchaufour, 2001).

La réalité est plus complexe car il existe une influence des variations saisonnières (ex : alternance de saisons sèche et humide, parfois plusieurs fois sur l'année) qui ont un impact majeur sur la pédogénèse, notamment sur la maturation de l'humus ou le lessivage des éléments.

### Les organismes vivants

**La faune et la flore (des micro-organismes aux humains) affectent la formation des sols.** Les organismes vivants ajoutent de la matière organique, composant essentiel des sols, par décomposition de la litière et des racines. Les micro-organismes tels que les champignons et les bactéries facilitent les échanges entre les racines et le sol et rendent accessibles aux plantes des nutriments essentiels. La faune et la flore permettent à l'humidité et aux gaz de pénétrer plus profondément le long des terriers et des canaux radiculaires. Les hommes peuvent avoir une influence sur la formation des sols par leurs pratiques de gestion du territoire qui perturbent les processus naturels et modifient les caractéristiques chimiques et physiques des sols. Les pratiques agricoles et les animaux creusant des terriers mélangent le sol des différents horizons, en particulier les couches de surface riches en matière organique (Atlas africain des sols).

**Les types de végétaux et la biomasse en surface sont fortement corrélés avec le climat.** La végétation apporte de la matière organique au sol et les organismes décomposent les matières organiques et structurent le sol. Les végétaux favorisent la météorisation physique du matériau d'origine par la pénétration des racines. La décomposition des matières organiques, qui sont riches en C, H et O, libère des H<sup>+</sup> qui favorisent la météorisation chimique du sol.



En réalité, la **présence des végétaux** (et la colonisation du sol par les racines) **joue un rôle essentiel dans la formation du sol**, et des milieux désertiques dénués de végétaux n'ont qu'une très faible différenciation du sol contrairement aux milieux avec un couvert végétal dense.

### Le temps

Le temps permet au sol de former des horizons qui reflètent les conditions locales. Comme il a été noté, **l'échelle de temps pour la formation d'un sol se mesure en milliers d'années**. Cependant, elle ne peut être considérée qu'en relation avec l'intensité de météorisation : des centaines de millions d'années dans un milieu aride peuvent donner des effets moins importants que quelques centaines d'années dans un milieu humide tropical. Plus les conditions de météorisation et de pédogenèse sont intenses, moins il faut de temps pour altérer le matériau d'origine et former des horizons distinctes.

### 1.2.2. Les types de sol

En Afrique sub-saharienne, on trouvera principalement comme types de sols (en gros, du Nord du continent vers le Sud) :

- Des sols désertiques
- Des sols marron et bruns
- Des sols ferrugineux et fersiallitiques (ex : ultisols) et des vertisols (ex : sols à argiles gonflantes)
- Des sols ferrallitiques (ex : oxisols) et des brunizem (en Afrique centrale)<sup>11</sup>.

Il existe énormément de variations et de types de sol que seuls des pédologues sont à même de reconnaître et de décrire valablement. Nous nous contenterons de décrire quelques types de sols représentatifs car le plus souvent rencontrés dans les pays ACP (en-dehors des sols désertiques dont nous ne parlerons pas étant donné qu'ils ne se prêtent pas à la culture).

#### 1.2.2.1. Les sols bruns

Les sols bruns se développent surtout sur des **pédoclimax**<sup>12</sup> forestiers aussi bien sur sols siliceux que calcaires. **Ce sont ces sols qui fournissent les meilleures terres agricoles.**

11 Pour le vocabulaire et la nomenclature des sols, se référer à des ouvrages comme « *Introduction à la science du sol* » de Philippe Duchaufour, DUNOD 2001 ; ou « *Référentiel pédologique* », Ed. Quae, 2008 (voir références bibliographiques).

12 Profil naturel du sol obtenu (après une longue période) en équilibre avec le climat, pour une végétation stable (ex : forêt), non modifiée par l'homme.

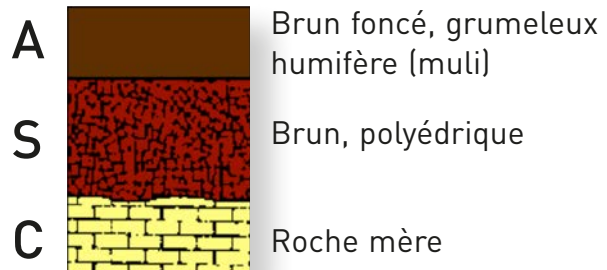
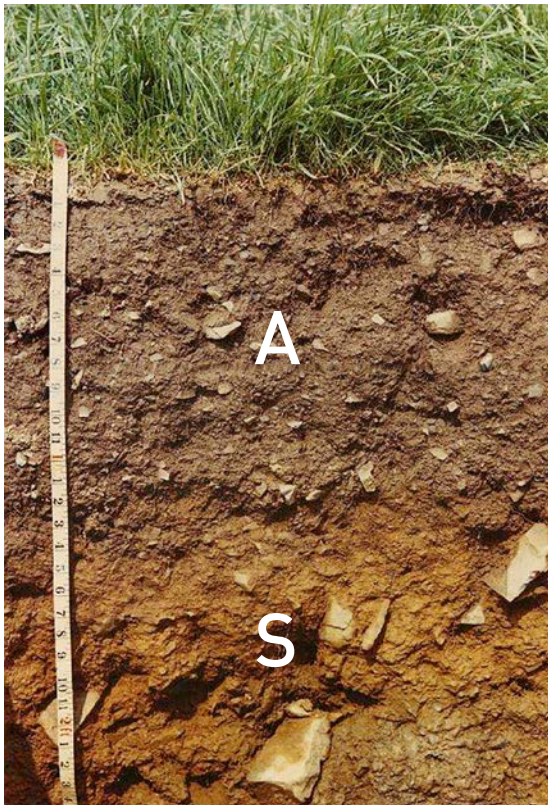


Figure 11 - Coupe pédologique d'un sol brun typique (horizons A et S)

L'horizon supérieur **A** est organique et minéral. Il peut être plus ou moins lessivé. Selon la nature de la roche-mère, l'humus peut être un *mull* (sols riches en bases et/ou en calcium actif), un *moder* (sols riches en bases, roche-mère siliceuse) ou un *mor* (roche siliceuse ou argiles, sols pauvres en bases, acides).

L'horizon **S** est dit d'altération ou structurel.

L'horizon **C** est la roche-mère.

Quand les sols bruns sont fragilisés (ex : par manque d'amendement humifère ou calcique), ils deviennent plus sensibles au «lessivage»; les sols **s'acidifient, et deviennent battants** en surface (c'est-à-dire qu'ils ont tendance à former une croûte en surface sous l'effet des pluies). Cet appauvrissement en matière organique ou en calcium est accéléré quand les agriculteurs oublient de pratiquer (ou simplifient grâce aux herbicides !) la rotation des cultures, ne chaulent pas et qu'ils satisfont les besoins des plantes seulement en leur apportant des engrais chimiques et en oubliant de soigner leurs sols. Par exemple, la monoculture intensive du maïs est une pratique culturelle très appauvrissante pour les sols bruns.

### 1.2.2.2. Les ferrugineux et fersiallitiques

Les **sols ferrugineux** sont des sols qui se forment essentiellement dans les régions où règne une **très longue saison sèche et sur un pédoclimax de savane à graminées** (ex : dans diverses régions d'Afrique tropicale). Les sols des régions semi-arides connaissent une altération chimique embryonnaire. Le lessivage est minime du fait de la faible durée de la saison des pluies. Ils donnent des terres légères, meubles, sablonneux.

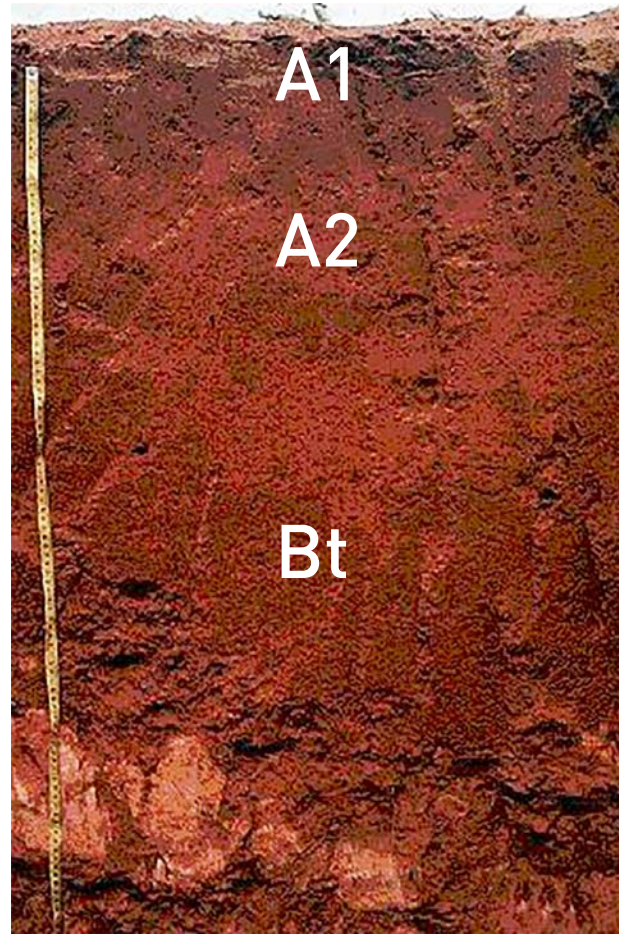


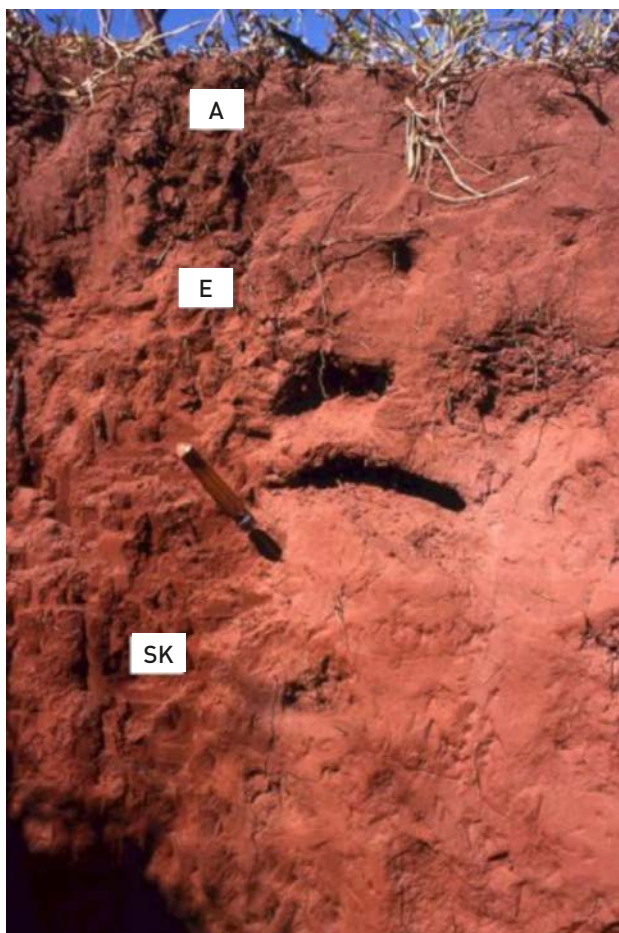
Figure 12 – Les lixisols : classés dans les «sols ferrugineux lessivés (peu acides)»

L'horizon A est composé de : A1 horizon peu épais, riche en matières organiques et en minéraux. Il surmonte un horizon A2 éluvial et un horizon B enrichi en colloïdes argileux, entraînés par lessivage (les spécialistes le nome Bt). Ces sols sont riches en fer, en argiles (kaolinite), mais pratiquement, voire totalement dépourvus d'alumine libre. Si ces sols se révèlent peu sensibles à l'action humaine, il n'en va pas de même de leurs couvertures végétales originales qui, suite aux cultures sur brûlis, sont profondément et durablement appauvries.

**Les sols fersiallitiques** sont aussi appelés **sols rouges**. Ces sols sont le résultat d'une association forte et stable entre des colloïdes argileux (montmorillonite) et des oxydes de fer. Les «terra rosea» méditerranéennes sont des sols rouges riches en oxydes d'aluminium qui se sont formés lorsque ces régions connaissaient un climat tropical. Ces sols sont généralement riches et fertiles, avec des humus stables, voire peu mobilisables. Mais ce sont de sols fragiles, particulièrement **sensibles à l'érosion éolienne ou hydrique**, surtout dans la situation de découverte végétale dans laquelle ces sols se retrouvent après un incendie ou par suite du surpâturage. L'érosion réduit ces sols à des sols squelettiques autour de croûtes calcaires stériles.



### 1.2.2.3. Les sols ferrallitiques



Les **sols ferrallitiques** sont des sols rouges **typiques de climat tropical humide**.

Ils sont très riches en oxydes de fer et en oxydes d'alumine. Ces sols se forment sous couvert forestier et en climat tropical ou équatorial. **Ce sont des sols très fertiles, mais extrêmement fragiles.**

On reconnaît les horizons :

- A, rouge, légèrement organique ;
- E, rouge clair, légèrement appauvri en argile ;
- Sk, rouge, argilo-sableux, d'altération à structure pédologique, riche en kaolinite

Figure 13 – Sol ferrallitique (sol est très différencié lessivé. Dénomination WRB : Acrisol)

Les **sols ferrallitiques** sont **des sols fragiles**, particulièrement sensibles à l'érosion éolienne ou hydrique, surtout dans la situation de découverte végétale dans laquelle ces sols se retrouvent après un incendie ou par suite du surpâturage. Dès l'instant où l'on supprime le couvert forestier qui les protège de l'érosion, mais surtout du lessivage, **ces sols se transforment rapidement en cuirasses** par suite d'une latéritisation (sols squelettiques autour de croûtes calcaires stériles). Les oxydes de fer et d'alumine colloïdale précipitent pour former des nodules (alios) qui, s'ils se soudent, forment des cuirasses définitivement stériles.

### 1.2.2.4. Les sols salins et les sols sodiques

Les **sols salins** sont ceux qui **présentent des concentrations excessives en sels solubles**. Ils contiennent divers sels de potassium ( $K^+$ ), magnésium ( $Mg^{2+}$ ), calcium ( $Ca^{2+}$ ), des chlorures ( $Cl^-$ ), des sulfates ( $SO_4^{2-}$ ), des carbonates ( $CO_3^{2-}$ ), bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) ou des nitrates ( $NO_3^-$ ). Ils se rencontrent principalement dans les régions sèches.



Les sols salins se développent au-dessus de roches riches en sodium, calcium ou magnésium par exemple. Il peut s'agir de roches naturellement riches en sodium ou de roches secondairement enrichies en sodium en provenance d'une nappe salée d'origine continentale ou marine. L'enrichissement secondaire peut aussi résulter de **mauvaises pratiques culturales**, au cours desquelles des remontées d'eau de la nappe chargée en sels finissent par stériliser les sols. Les causes de ces remontées de sel sont multiples. **L'irrigation, associée à une forte évapotranspiration, est une des causes la plus souvent avancée.** Les sols salins se caractérisent par un profil simple avec un seul horizon A, assez épais, constitué de matières organiques et minérales encroûtées de dépôts de sel précipité.

Figure 14 - Exemple de profil d'un sol salin

**Les sols sodiques - aussi appelés sols alcalins-** sont des sols dont la structure pédologique est conditionnée par la teneur en sodium adsorbé sur le sol ( $\text{Na}^+$ ).

#### 1.2.2.5. *Les sols hydromorphes*

Les sols hydromorphes se rencontrent surtout dans les régions humides. Ils résultent de l'engorgement permanent des horizons profonds les rendant asphyxiques et réducteurs. L'horizon A1 supérieur est un horizon mixte organique et minéral. Les sols souffrant d'hydromorphie sont généralement à dominante argileuse. Leur structure est souvent lourde et compacte et peut entraîner l'asphyxie racinaire d'une culture, et mort ou ralentissement de la vie microbienne.





Figure 15 – Exemple de sol hydromorphe. Couleurs typiques.

L'horizon profond est un gley ou un pseudogley. Cet horizon se caractérise par ses conditions asphyxiques et réductrices où le fer à l'état divalent (ferreux) lui confère une couleur verdâtre. Dans la zone de battance de la nappe phréatique qui l'ennoe, on peut observer des zones où le fer, parce qu'il a été au contact de l'oxygène, est sous sa forme trivalente (ferrique) et de couleur rouille. La répartition, dans le profil du sol de ces plaques de fer ferrique, sont une bonne indication sur l'amplitude de variation en hauteur de la nappe d'eau.

### 1.3. LES PROPRIÉTÉS IMPORTANTES DES SOLS

#### 1.3.1. Les propriétés physiques des sols

##### TEXTURE OU STRUCTURE ?

La texture du sol donne la proportion de particules minérales de différentes tailles. Les principales classes de taille des particules sont l'argile (< 0,002 mm), le limon (0,002 à 0,063 mm) et le sable (0,063 à 2,0 mm). La texture peut être estimée au toucher entre les doigts et mesurée par tamisage et sédimentation. Les classes texturales peuvent varier selon les pays.

La **structure du sol désigne l'arrangement des particules** du sol (également appelés **agrégats**) et l'espace qui les sépare (pores). La structure est donc importante pour le mouvement de l'eau et de l'air et pour le développement des racines (la porosité du sol est un élément essentiel à considérer). Le type de structure du sol dépend de l'activité biologique, des caractéristiques physicochimiques et minéralogiques, de la matière organique et de la gestion du sol (des pratiques agricoles, y compris de l'usage plus ou moins intensif des engrais chimiques et des pesticides).

*(Voir l'Atlas africain des sols)*



1.3.1.1. La texture du sol

Comment définir la texture d'un sol ?

La texture d'un sol est la **répartition granulométrique** de ses constituants. C'est la proportion entre les petites particules, les argiles, les particules de taille moyenne, les limons, et particules de grande taille, les sables (dont le diamètre reste tout de même inférieur à 2 mm). L'analyse granulométrique du sol consiste à classer les éléments minéraux du sol **d'après leur grosseur**, et à déterminer le pourcentage de chaque fraction. On déterminera si un sol est **plutôt sablonneux, limoneux ou argileux**.

A la suite d'une convention internationale, les particules sont classées de la façon suivante, en fonction de leur diamètre :

Terre fine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• argiles</li> <li>• limons fins</li> <li>• limons grossiers</li> <li>• sables fins</li> <li>• sables grossiers</li> </ul>	Particules de moins de 2 µm 2 à 20 µm 20 à 50 µm 50 à 200 µm 200 µm à 2 mm
Éléments grossiers (squelette)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• graviers</li> <li>• cailloux</li> <li>• pierre</li> <li>• blocs</li> </ul>	2 à 20 mm 2 à 7,5 mm 7,5 à 20 cm > 20 cm

L'ensemble formé par les argiles, les limons et les sables forment la terre fine du sol, tandis que cailloux et graviers constituent les éléments grossiers.

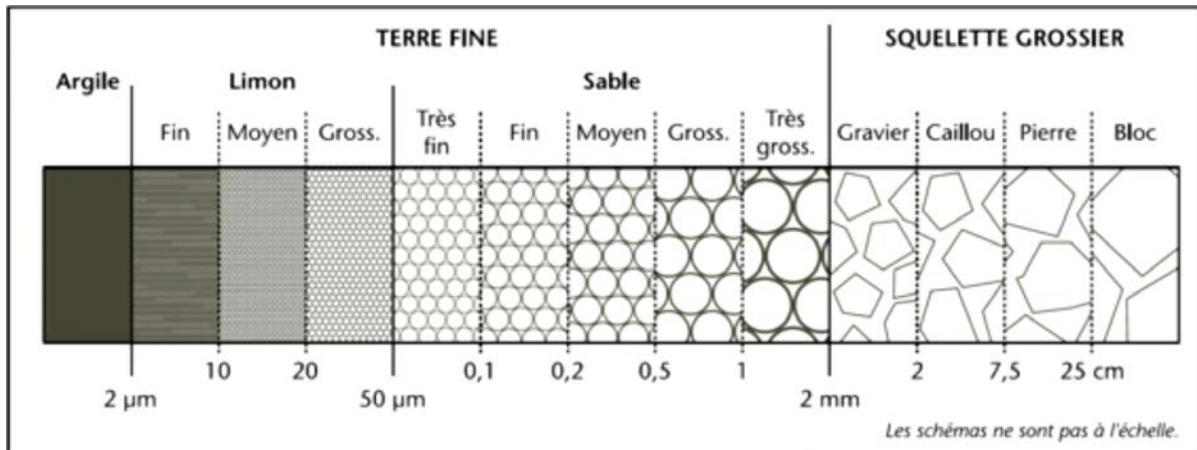


Figure 16 - Représentation schématique des différentes textures de sol

Cette classification est représentée à l'aide d'un triangle, appelé **triangle des textures** (figure 17), dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile. Lorsque l'on dispose des pourcentages des éléments majeurs, à savoir ARGILE, LIMON, SABLE (ramenés à 100%, donc en excluant la matière organique et les refus, c'est à dire tout ce qui ne passe pas dans un tamis de 2mm), **on peut utiliser le triangle de texture pour déterminer la nature du sol.**

Comment l'utiliser ? Il faut porter sur les trois axes les pourcentages d'argile, de limons et de sable. Pour chacun des points ainsi trouvés, mener une parallèle à l'axe précédent (ex : pour l'argile, l'axe précédent est le sable, etc.). L'intersection de ces trois parallèles désigne la classe du sol.

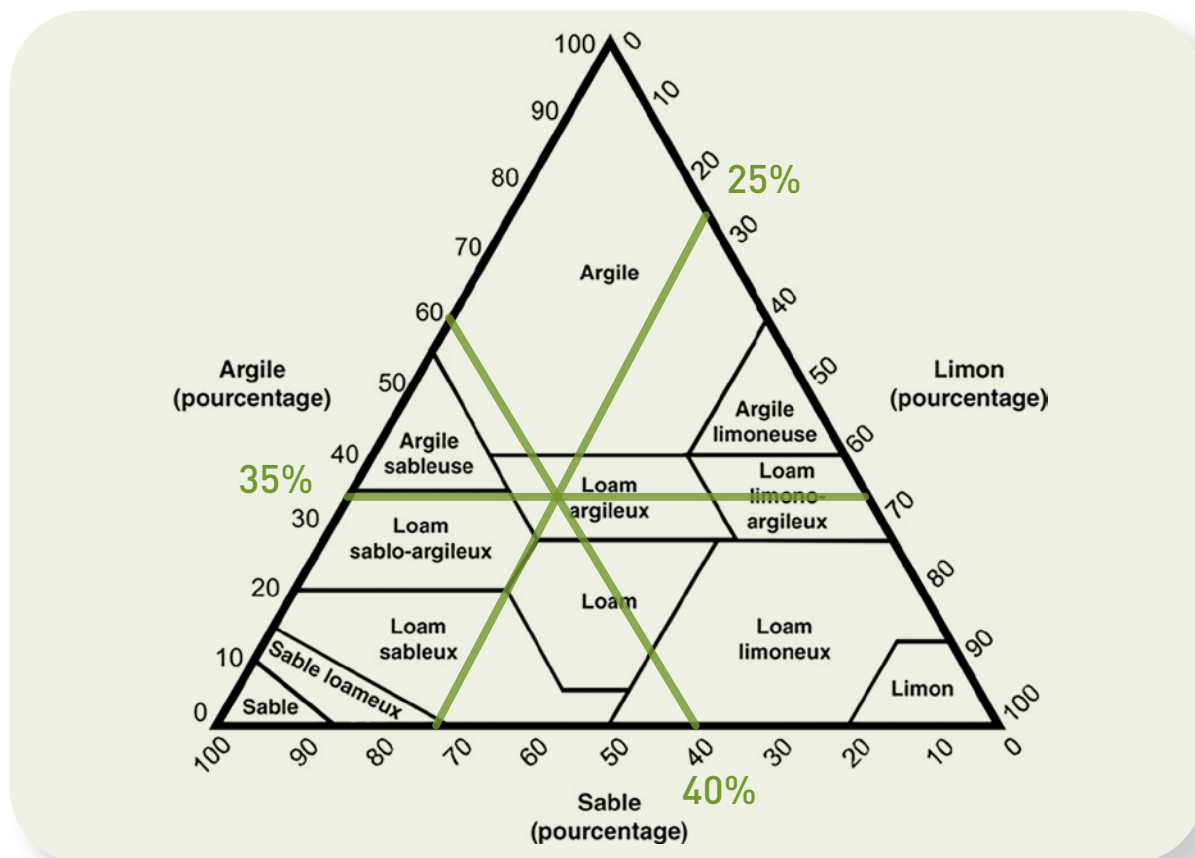


Figure 17 - Représentation du « triangle des textures » : exemple de détermination de la nature d'un sol avec 35% d'argile, 25% de limon et 40% de sable

Il existe **4 classes fondamentales de textures** qui permettent de définir les principales propriétés du sol :

1. *texture sableuse* : sol bien aéré, facile à travailler, pauvre en réserve d'eau, pauvre en éléments nutritifs, faible capacité d'échange anionique et cationique.
2. *texture limoneuse* : l'excès de limon 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 calcium.
3. *texture argileuse* : sol chimiquement riche, mais à piètres propriétés physiques ; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines ; travail du sol difficile, en raison de la forte plasticité (état humide), ou de la compacité (sol sec). Une bonne structure favorisée par l'humification corrige en partie ces propriétés défavorables.
4. *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.

## Importance de la texture du sol

La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques :

- Les sols riches en sables sont perméables, filtrants, ce d'autant plus que le sable est grossier,
- Si aux éléments grossiers, s'adjoignent beaucoup de sable fin et de limon, ceux-ci tendent à colmater les interstices entre les éléments grossiers, rendant le sol plus ou moins imperméable,
- Si des proportions suffisantes d'argile s'ajoutent aux limons et aux sables, surtout en présence d'humus, une structure fragmentaire peut prendre naissance, garantissant, à la fois, une perméabilité **tout en retenant assez d'eau pour la végétation.**

## Appréciation de la texture du sol sur le terrain

L'appréciation tactile de la texture sur le terrain **peut se faire en malaxant entre le pouce, l'index et le majeur quelques cm<sup>3</sup> de terre fine** (il faut écarter au préalable tous les éléments grossiers de l'échantillon prélevé) empruntée à l'horizon à tester :

- **Les argiles** peuvent se pétrir en pâtons qui ne s'effritent pas dans la main. Le pâton colle un peu aux doigts, devient même très collant s'il est gorgé d'eau ; il est possible alors d'en faire un boudin assez fin (quelques mm de diamètre). À l'état sec, l'argile forme des blocs très durs et fortement cohérents, ne tachant pas les doigts, qu'il devient très difficile d'humecter au-delà de 40% d'argile.
- **Les sables** grattent sous les doigts à partir de 0,1 mm. Si les sables sont dominants, il se peut que l'on n'arrive pas à confectionner une boulette ou un boudin. Les sables fins inférieurs à 0,1 mm ne grattent pas mais restent perceptibles par crissement à l'oreille (un limon humide sans sable ne crisse pas).
- **Les sols riches en limons** donnent, entre les doigts, des sensations d'onctuosité, le pâton est facilement malléable, s'écrasant par une pression faible. Les boudins se cassent vite à un fort diamètre. À l'état sec, le limon est poussiéreux, dessèche et tache les doigts ; des petits agrégats éclatent et se pulvérisent sous la pression des doigts.

Les critères de classification sont les suivants :

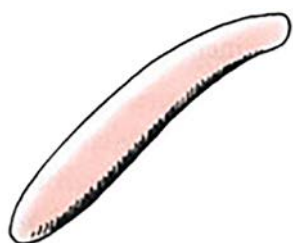
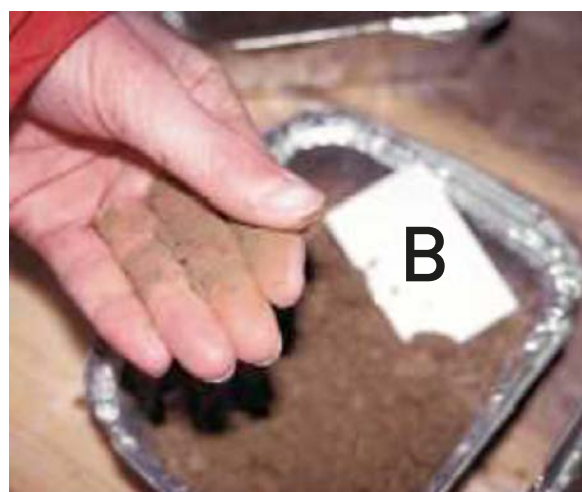
Texture du sol	% de sable	% de limon	% d'argile
Sols sableux	70 et plus	0 à 30	0 à 15
Sols limoneux	0 à 20	80 et plus	0 à 15
Sols argileux	0 à 45	0 à 40	25 et plus
Sols équilibré	40 à 60	30 à 50	15 à 25

En ce qui concerne la **détermination du pourcentage d'argile**, on peut effectuer le « test du boudin » : il s'agit d'essayer de rouler l'échantillon de terre fine prélevé en un boudin de 5 à 10 mm de diamètre. Pour cela, il faut veiller à avoir une humidité

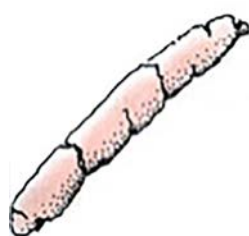


suffisante mais non excessive pour permettre le pétrissage : si trop sec, rajouter de l'eau ; si l'horizon est gorgé d'eau, le malaxage entre les doigts provoque un rapide et relatif assèchement.

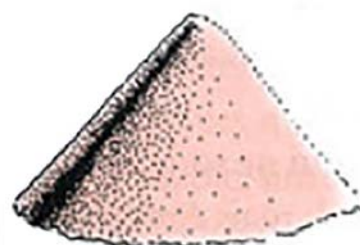
Le boudin impossible à fabriquer	Moins de 10-12% d'argile
Le boudin se fragmente une fois roulé sur la paume de la main	Moins de 18% d'argile
Le boudin ne se fragmente pas mais ne peut être enroulé en anneau	Entre 18 et 25% d'argile
L'anneau peut être réalisé et ne se brise pas	Plus de 25-30% d'argile



*Boudin souple, malléable :  
terre argileuse*



*Boudin fragile :  
terre limoneuse*



*Impossible de produire un boudin :  
terre sableuse*

Figure 18 - A : test du boudin, sol riche en argile, le boudin se forme.  
B : sol riche en limon, tache les doigts (teinte les doigts).

### Appréciation de la texture du sol en laboratoire

La texture est déterminée suite à une analyse granulométrique d'un échantillon de terre fine.

Il est à noter que différents traitements préalables (chimiques et/ou aux ultrasons) sont appliqués à l'échantillon de manière à obtenir une bonne dispersion des particules. Ces traitements servent donc à désagréger complètement les agrégats, ce qui implique de détruire les « ponts » qui constituent le « complexe argilo-humique » (CAH) : un premier traitement assure la destruction de la matière organique par l'eau oxygénée, un deuxième traitement utilisant un sel dispersant sera ensuite effectué.



La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques.

C'est ainsi que la texture du sol a une influence primordiale sur le régime hydrique des sols :

- sur la réserve utile maximale de chaque horizon, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale dont la végétation peut disposer. Il est bien connu par exemple que les sols sableux ont de faibles réserves en eau.
- sur la circulation de l'eau dans le sol : un sol riche en sable est perméable et filtrant, un horizon argileux peut former un obstacle à l'infiltration verticale de l'eau,...
- En outre, la texture joue un rôle dans l'aération du sol et sa porosité : une texture sableuse est le signe d'un sol bien aéré tandis qu'une texture trop argileuse sera le signe d'un milieu imperméable et mal aéré, formant alors un obstacle à la pénétration des racines.

### 1.3.1.2. *La structure du sol*

#### Comment expliquer la structure du sol ?

La structure d'un sol, c'est **la manière dont les particules du sol s'agencent les unes sur les autres pour former de petites mottes.**

La structure du sol fait référence à **la taille, la forme et la disposition des constituants solides** (minéraux et organiques) et des constituants gazeux (vides), à **la continuité des pores**, leur capacité à retenir et transférer les fluides et les substances organiques et inorganiques, et à **sa capacité de servir de support de la croissance et le développement des racines.**

La **porosité du sol** est définie comme le rapport entre le volume total occupé par les pores (« les vides ») et le volume total (« les vides » + « les pleins ») d'un échantillon. Les pores du sol **forment un réseau dans lequel circulent l'eau et les gaz** (l'air notamment qui est important pour l'oxygénation des racines). Pour survivre, la plupart des organismes (animaux ou végétaux) ont besoin d'air et d'eau. Lorsque la structure du sol est bonne, cela signifie que les agrégats sont suffisamment espacés pour laisser des macro et micropores entre eux et donc permettre la circulation d'air et d'eau (figure 19).

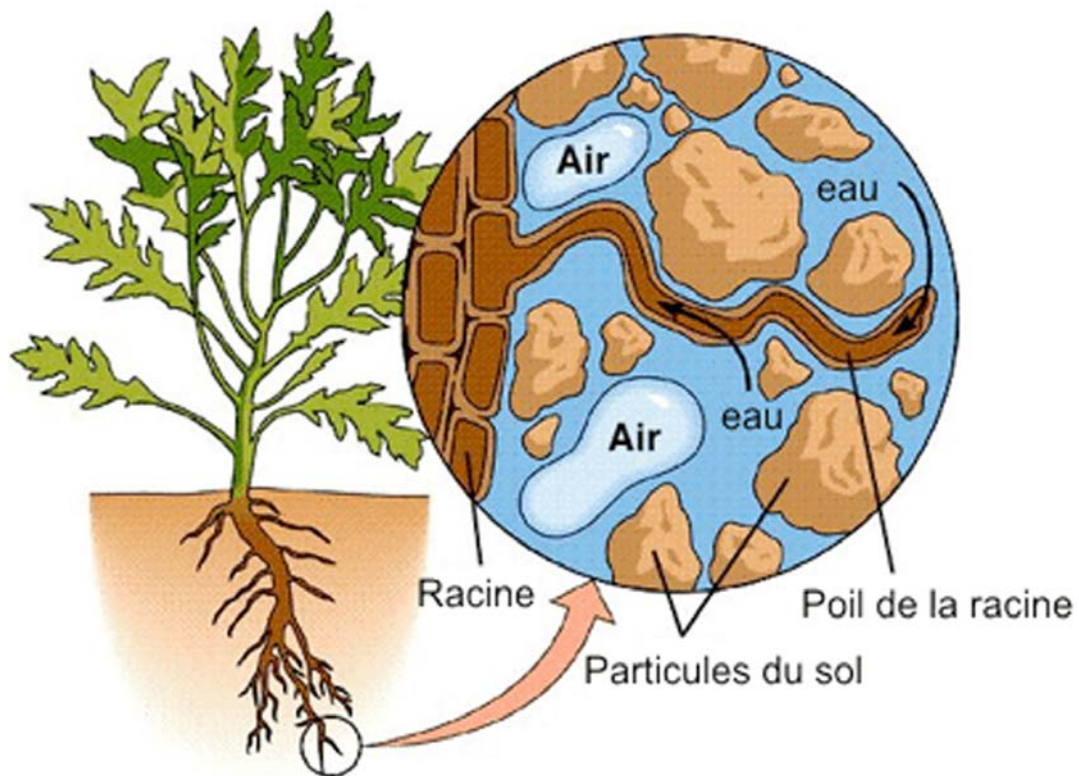


Figure 19 – Circulation de l'air et de l'eau dans le sol (Source : Supagro, France)

Les **pores du sol** ont des origines différentes :

- les éléments structuraux terreux, agrégats ou mottes, ménagent des vides entre eux, du fait de l'activité biologique, des cycles de dessiccation-humectation ou de gel-dégel liés au climat, et des opérations agricoles. Ces vides, appelés **pores structuraux ou macropores**, sont visibles à l'œil nu (diamètre supérieur à quelques centaines de microns) ;
- à une échelle plus fine (de quelques dizaines de micromètres à quelques nanomètres) d'autres pores constituent la majeure partie de la porosité du sol. Ils résultent de l'assemblage des particules de sable et de limon avec les constituants argileux, et de l'arrangement des minéraux argileux en feuillets. Ces **pores texturaux sont appelés micropores**.

Nous verrons au chapitre 3 comment mesurer la porosité d'un sol.

L'aptitude d'un sol à l'infiltration de l'eau ou à son stockage, qui conditionne notamment sa disponibilité pour la plante, est **fonction de la taille des pores et de leur organisation** dans l'espace. Ceux de grande taille favorisent la circulation rapide de l'eau mais en revanche ne permettent pas de la stocker. À l'opposé, l'eau circule lentement dans les pores de petite taille, ceux-ci assurant son stockage dans le sol.

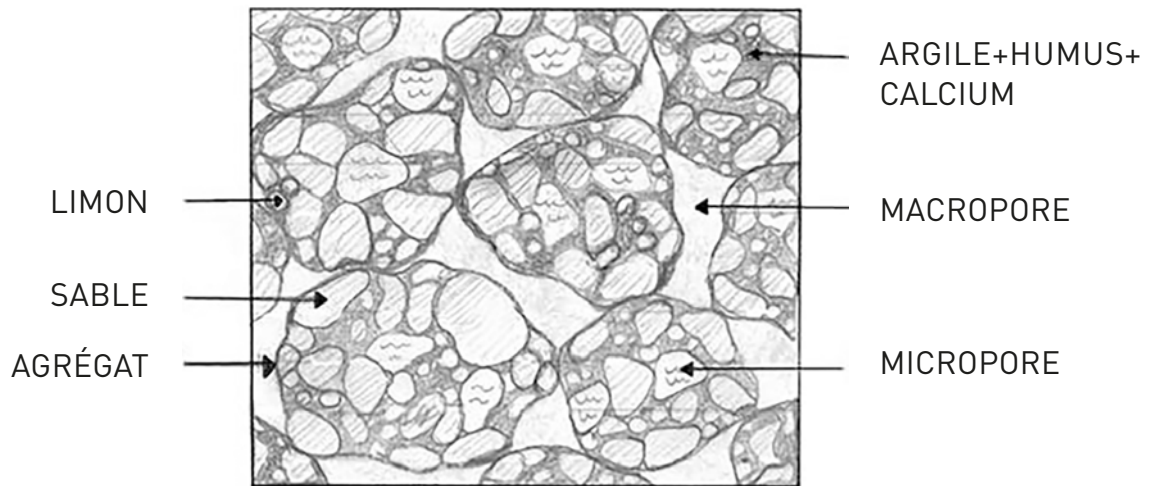


Figure 20 – Représentation schématique de la structure du sol

Il est clair que la structure du sol peut se décrire à plusieurs échelles (particules minérales, agrégats, etc...).

### Les types de structures

Il existe **trois grands types de structures**: grumeleuse, compacte et intermédiaire. La structure grumeleuse est celle qui correspond le mieux à la plupart des cultures.

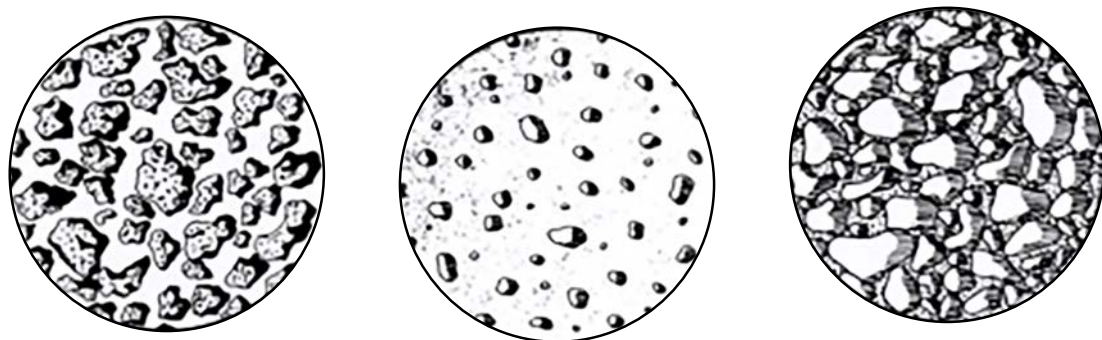


Figure 21 – Exemples de structures du sol observables : photos et schéma de la structuration des agrégats : grumeleux, compact (ou massif) ou et intermédiaire (ou particulaire)

(Source : Supagro, France)

La structure « **grumeleuse** » est le **signe d'une bonne perméabilité** et d'une meilleure aération du sol. Quand la structure de sol est plus massive et plus compacte cela engendre : (1) un risque d'asphyxie pour les racines des plantes ; (2) une difficulté pour les racines de pénétrer profondément dans le sol (cela peut entraîner une déformation des légumes-racines, ou diminuer le volume des racines ce qui réduit la croissance des plantes et ce qui les rend plus sensibles pendant les périodes de sécheresse).

### La stabilité structurale du sol

La stabilité des agrégats (ou stabilité de la structure) d'un sol, caractérise **la résistance de la structure de celui-ci face à l'action dégradante des facteurs mécaniques ou physico-chimiques**. La structure du sol est un des facteurs principaux agissant sur la croissance des plantes, du fait de son influence sur la pénétration des racines, la température du sol, les échanges gazeux et hydriques, ainsi que sur l'émergence des semis. C'est donc à ce titre un paramètre important pour les agriculteurs.

La structure est donc un **état susceptible de modifications dans le temps**, sous l'influence de facteurs, favorables ou défavorables :

#### Facteurs favorables :

- Teneur en matière organique (en prenant en compte la qualité de l'humus)
- Teneurs équilibrées en argile et en humus, riche en acides humiques
- Présence de calcium échangeable
- Teneurs suffisantes en oxydes de fer et d'aluminium
- Présence de vers de terre, et des espèces fouisseuses comme les des termites, jouant un rôle primordial dans la formation des complexes argilo-humiques (vie biologique du sol).

#### Facteurs défavorables :

- Faible teneur en matière organique
- Tassement et compaction par passage des engins lourds
- Actions mécaniques des pluies battantes
- Altération des ciments colloïdaux.
- Faible activité biologique dans le sol.

### 1.3.2. Les propriétés physico-chimiques des sols

#### 1.3.2.1. *Le complexe argilo-humique et la capacité d'échange cationique*

#### Le complexe argilo-humique (CAH) du sol

D'un point de vue chimique, **argile et humus ne devraient normalement pas se lier entre eux** car les **micelles** d'humus et d'argiles sont toutes deux (électro)négatives, et se repoussent donc naturellement. Pourtant certaines communautés d'organismes vivant du **sol** (comme les **champignons** du sol ou **les vers de terre**) sont capables de produire de tels complexes **en liant les argiles et les humus**.





Les deux structures, chargées négativement, devraient se repousser, mais sont étroitement liées par l'intermédiaire de « ponts cationiques » chargés positivement et de « colles biologiques » :

- **le calcium** a une action stabilisatrice. Il s'intercale entre l'humus et les feuillets des argiles, formant des ponts calciques très résistants et aérant la structure du sol. ;
- **le magnésium** forme lui aussi des ponts cationiques mais avec une action de resserrement de la structure.
- des **ponts constitués d'hydroxydes de fer** peuvent également se mettre en place, mais ils sont moins solides que les ponts calciques.
- enfin, **l'activité biologique dans le sol a un rôle fondamental**. La présence de certaines molécules organiques permet d'« enrober » les complexes, ce qui les stabilise en présence d'eau. Parmi ces substances, on trouve la **glomaline**. Elle est produite en abondance sur les hyphes et les spores des champignons mycorhiziens à arbuscules dans le sol et dans les racines ou secrétée par les vers de terre. Les déjections des vers de terre (turricules) forment des agrégats issus du mélange de matière organique (humus) et de matière minérale (argile). La formation d'un CAH stable se réalise à l'intérieur **du tube digestif du ver de terre**, qui sécrète la glomaline ce qui stabilise le CAH et le rend résistant à la dégradation par l'eau.

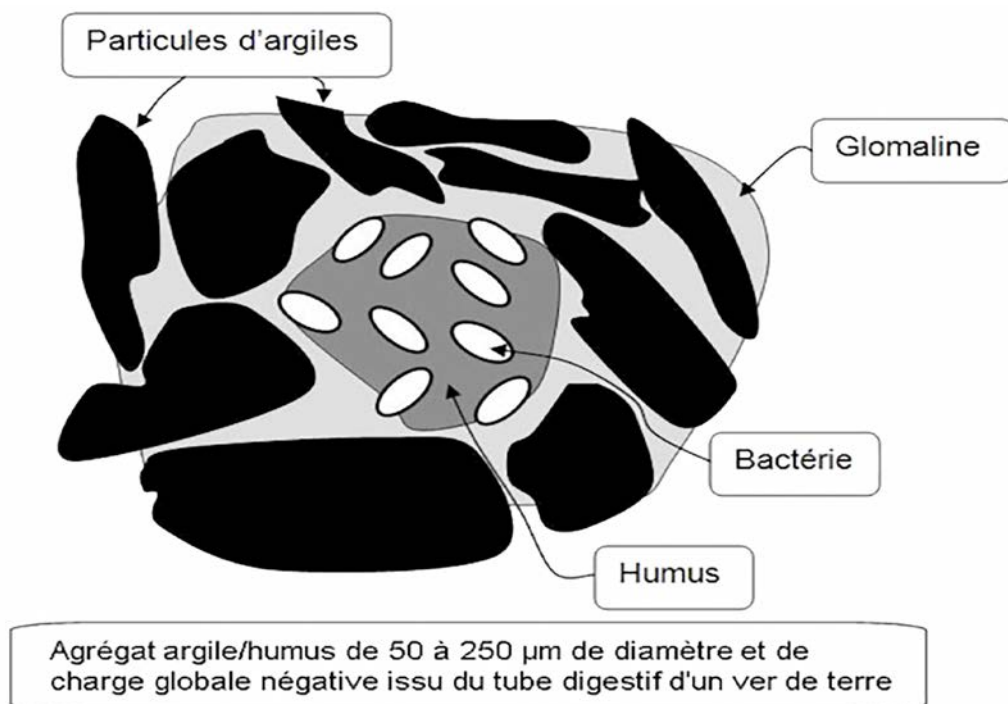


Figure 22 – Rôle de la glomaline dans la stabilité des agrégats

Le complexe argilo-humique est donc une structure formée de minéraux argileux et d'humus (l'humus, qui est la fraction « stable » de la matière organique du sol est peu sujette à la minéralisation, mais participe ainsi à la **structuration du sol**).

La stabilité des complexes formés varie en fonction du :

- type d'argile : elle intervient par sa taille, l'importance de ses charges négatives et son aptitude à fixer des molécules organiques.
- type de cation de liaison : en ce qui concerne le type de liaison, cette stabilité dépend de la valence et du rayon ionique du cation. Les cations monovalents donnent généralement des complexes moins stables que les cations polyvalents.
- type d'humus : la stabilité est variable suivant la nature des composés humiques, plus ces composés sont polycondensés plus la stabilité du complexe est grande.

D'après Soltner (2005), quand il est stable, le CAH procure au sol des propriétés toutes favorables à sa fertilité.

On trouve ces « complexes argilo-humiques » (CAH) dans les agrégats constitutifs du sol où ils jouent un rôle écologique et agronomique majeur. Ils sont essentiellement d'origine biogénique (créés par le vivant) expliquent la stabilité (résistance à la pluie par exemple) et la productivité exceptionnelle des sols riches en humus et en matière organique. Ils protègent très efficacement les sols qui en contiennent de la battance des pluies ou de l'excès d'humidité.

Le rôle du CAH est multiple :

- la floculation des colloïdes, argileux et humiques favorise une structure aérée et un stockage hydrique suffisant ;
- la liaison argile-humus freine la minéralisation de la matière organique humifiée, donc la perte de matière organique susceptible de se lier à l'argile ;
- l'argile liée à l'humus est retenue. Elle ne se disperse pas, évitant ainsi le colmatage et la compaction du sol ;
- l'intégration de l'argile et de l'humus dans un même complexe augmente la capacité du sol à retenir les bioéléments indispensables aux plantes.
- le complexe absorbant joue un rôle tampon fondamental pour le maintien d'un pH stable dans les sols.

i

Le CAH possède la propriété de retenir à sa surface les **cations échangeables** de la solution du sol (pouvoir adsorbant). Ces cations peuvent s'échanger avec la solution du sol et les plantes et constituent le réservoir de fertilité chimique du sol, c'est ce qu'on appelle la capacité d'échange cationique.



Figure 23 – Rôle du complexe argilo-humique (C.A.H) : présent, il fixe les cations et empêche leur perte par transfert (leur lixiviation) (à droite le C.A.H retient les éléments).

### IMPORTANCE DE LA TENEUR EN MATIÈRE ORGANIQUE DANS LE SOL

En voyant comment se forme le complexe argilo-humique et ses multiples rôles, on comprend pourquoi la qualité et la teneur en matière organique du sol est aussi importante pour la fertilité des sols. Une teneur faible en matière organique aura un effet néfaste sur la structure du sol (peu d'agrégats formés). Un sol riche en matière organique retient mieux l'eau et est une source importante de nutriments pour la plante. Les nutriments qui sont facilement accessibles pour la plante se trouvent soit dans la solution du sol, soit sont adsorbés (retenus, concentrés en surface) par la matière organique bien décomposée ou par les particules d'argile. Les nutriments adsorbés constituent un stock de nutriments facilement accessibles pour la plante.



Figure 24 - Les racines et radicelles, des hyphes fongiques et des «colles biologiques» stabilisent les micro-agrégats et donnent au sol une bonne structure (Photo : J.C. de Morales, Université Estadual de Ponta Grossa).

## La capacité d'échange cationique (CEC) du sol

Quand un sel minéral est en dissolution dans l'eau du sol, il s'y trouve en partie à l'état dissocié, scindé en deux ions: l'**anion, chargé négativement** et le **cation, chargé positivement**. Les particules d'argiles et d'humus étant tous deux chargés négativement, ils retiennent à leur surface les cations. L'humus a un pouvoir adsorbant quatre fois plus important que celui des argiles. La CEC correspond donc au **nombre de sites négatifs proposés à l'adsorption** par l'argile et l'humus du sol.

L'hydrogène est le cation le plus énergiquement retenu par le complexe. Si l'acidité du sol est forte les ions  $H^+$  déplacent les autres cations et occupent les sites d'adsorption sur le complexe argilo-humique. Mais quand le pH est proche de la neutralité, des échanges peuvent avoir lieu entre la surface du CAH et la solution du sol, et d'autres cations ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ...) peuvent être retenus: ce sont des éléments bien plus intéressants car essentiels pour la nutrition de plante. Les **cations qui sont continuellement en mouvement** représentent les éléments minéraux à l'état échangeable et qui sont **bio-disponibles** pour la plante. Nous verrons au chapitre 3 quels sont les éléments nutritifs nécessaires à la croissance et à la production des plantes.

Des échanges de cations ont lieu entre le complexe argilo-humique et la solution du sol, constituant le réservoir de fertilité chimique du sol: c'est ce qu'on appelle la capacité d'échange cationique (CEC). La capacité d'échange cationique (CEC ou T pour capacité totale) d'un sol est la quantité de cations que celui-ci peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné.

Plus le sol est riche en argile et matière organique (surtout en humus), plus sa CEC est importante. Plus elle est élevée, moins les cations seront lessivés et plus ils seront accessibles aux plantes.

La valeur de la CEC est fortement liée au rapport C/N et au pH du sol. L'augmentation du pH du sol permet d'augmenter la CEC effective, c'est-à-dire celle qui est disponible pour la mise en réserve des cations échangeables.



La CEC est donc un **bon indicateur de la fertilité d'un sol** (indiquant sa capacité de rétention en éléments nutritifs). **Chaque sol a une CEC bien précise qui correspond à la quantité de cations qu'il peut fixer**, à un pH donné:

- pour un sol argileux, la CEC est importante: il peut libérer ces éléments nutritifs au fur et à mesure aux racines de la plante, parce qu'il contient beaucoup de particules très fines, avec une surface relative par gramme de sol très importante.
- par contre un sol sableux a une capacité très faible de rétention des nutriments: il n'est donc pas conseillé d'appliquer des doses importantes d'engrais sur des sols sableux à cause des pertes importantes.



Le **taux de saturation (S/T)** est le rapport entre la **somme des cations échangeables**, extraits par une méthode conventionnelle, et la **CEC** mesurée le plus souvent à un pH standard ramené à 7 (CEC Metson). Le taux de saturation est exprimé en % et varie de 50-60% en sols acides à plus de 120% dans les sols calcaires. La capacité d'échange d'un sol est saturée quand tous les hydrogènes ou protons  $H^+$  sont remplacés par des cations tels que  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  et  $K^+$ , aussi appelés cations échangeables. Pour neutraliser les ions  $H^+$ , il faut apporter des radicaux  $OH^-$  libérés par la chaux ou les carbonates contenus dans les amendements minéraux basiques.

### Le calcium échangeable

Le calcium est le cation majoritairement adsorbé sur le CAH. Il est naturellement présent en très grande quantité dans les sols calciques et surtout calcaires. Le calcium joue un rôle déterminant sur les fertilités physique (stabilité des structures du sol, sensibilité à la battance, échanges gazeux et hydriques...), chimiques (fonctionnement de la CEC, désalinisation...) et biologique (activité de la biomasse microbienne...) du sol. Secondairement, le calcium est aussi un élément nutritif pour les plantes. Mais ces rôles ne sont pas tenus par n'importe quelle forme de calcium.

**Dans la nature, le calcium peut se trouver sous quatre formes différentes :**

1. *Le calcaire inactif (carbonate de calcium)*: c'est celui qui se trouve à l'état grossier, c'est-à-dire celui qui constitue les cailloux, les graviers et les sables. L'action de l'acide carbonique des eaux de pluie est quasi inexistante sur ces matériaux. Il existe une autre forme de calcaire inactif, c'est celle qui correspond au calcium contenu dans des minéraux silicatés comme les feldspaths, les micas, les amphiboles ou les pyroxènes.
2. *Le calcaire actif*: c'est aussi du carbonate de calcium, mais celui-ci est à l'état pulvérulent. Ces particules sont d'une taille voisine de celle des limons (20  $\mu m$ ) ou de celle des argiles (2  $\mu m$ ). Ces particules sont facilement attaquables par l'acide carbonique des eaux de pluie ou par les acides organiques du sol. Le carbonate de calcium est transformé en bicarbonate de calcium soluble qui va saturer le complexe adsorbant (CAH).
3. *Le calcium soluble*: c'est celui qui se trouve ou est apporté sous forme de bicarbonate  $Ca(CO_3H)_2$ , de chaux  $Ca(OH)_2$ , de nitrate de calcium  $Ca(NO_3)_2$  ou de phosphate monocalcique  $Ca(H_2PO_4)_2$ . Toutes ces formes libèrent du calcium dans la solution du sol et participent à saturer le complexe adsorbant (CAH).
4. *Le calcium échangeable*: il est représenté par le calcium adsorbé sur les colloïdes argilo-humiques et plus généralement sur les complexes adsorbants. Généralement, il s'établit un équilibre entre les ions  $Ca^{++}$  adsorbés et les ions  $Ca^{++}$  libres dans la solution du sol. Contrairement à certains ions qui peuvent être immobilisés durablement, voire définitivement ( $K^+$ ,  $NH_4^+$ ) sur les complexes adsorbants, **les ions calcium restent toujours échangeables. Le calcium solubilisé dans la solution du sol plus le calcium adsorbé (toujours plus abondant), constituent la totalité du calcium échangeable.**

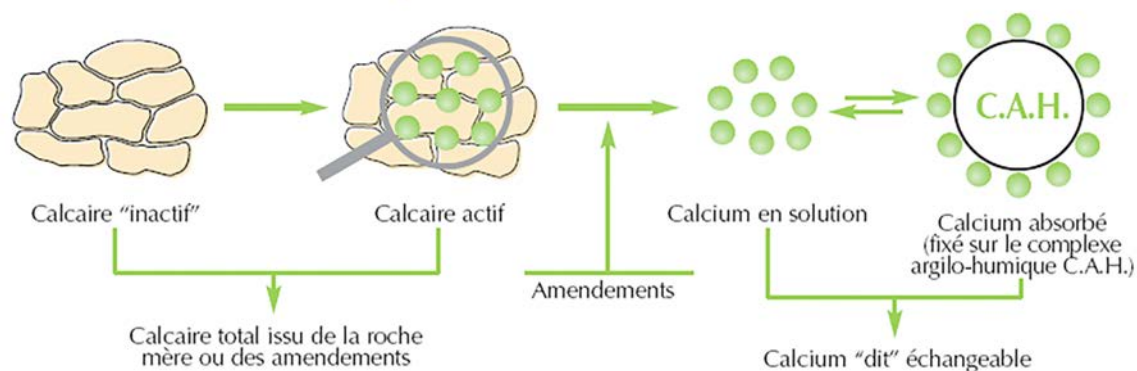


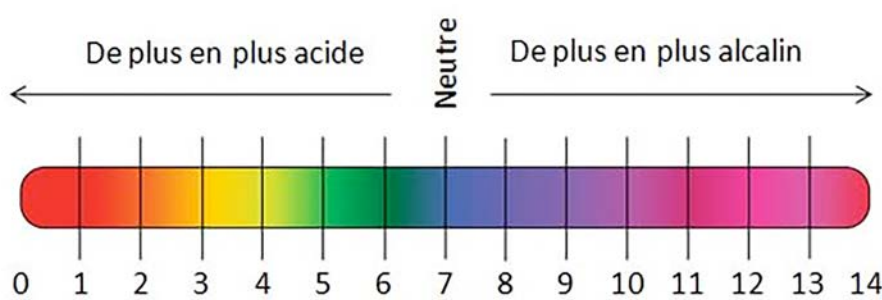
Figure 25 - Les formes du calcium dans le sol et la définition du calcium échangeable [source: Wiki Aurea].

Nous verrons au chapitre 5 l'importance de mesurer la teneur en calcium échangeable. Connaître cette teneur est essentiel pour évaluer, associée à la valeur de la CEC, la proportion de calcium (taux de saturation partiel en calcium de la CEC) pour adapter les stratégies de chaulage en sols acides ou ayant tendance à s'acidifier.

### 1.3.2.2. L'acidité du sol (le pH) et le pouvoir tampon du sol

#### Acidité (pH) du sol

L'acidité se définit par la concentration en ion  $H^+$  dans l'eau du sol et se mesure par le pH qui détermine son degré d'acidité ou de basicité ( $pH_{eau}$ ). La mesure (normalisée) du pH doit se faire sur un rapport volume de terre / volume de solution de 1/5. Le pH est une mesure conventionnelle qui permet de comparer l'acidité des sols et de voir leur évolution (vers l'acidité ou vers alcalinité).



La grande majorité des ions  $H^+$  du sol proviennent des activités biologiques qui s'y déroulent. Un  $pH_{eau}$  inférieur à 7 caractérise un sol acide, alors qu'une valeur de pH supérieure à 7 fait référence à un sol basique (aussi qualifié d'alcalin)<sup>13</sup>. La plupart des sols se situent entre 4 et 9, et la plupart des plantes apprécie une terre neutre à légèrement acide (pH 6,5).

13 En sols non calcaires, on peut aussi mesurer le pH KCl, un pH « théorique » qui permet de connaître l'acidité potentielle du sol. Il correspond au pH « plancher » vers lequel tendent tous les sols à cause du processus d'acidification. Le pH KCl est toujours inférieur au pH eau, l'écart entre les deux varie de 0,2 à 1,5. Quand l'écart est > 1, l'acidité de réserve est élevée. Quand il est < 0,5, cette réserve est faible (cf. chapitre 3).

Afin de permettre la croissance des plantes, **un sol ne doit pas être trop acide ou trop basique**. Une acidité ou une basicité trop élevée nuit à l'absorption par les végétaux des éléments nutritifs contenus dans le sol. Une croissance végétale optimale est possible sur un sol dont le pH se situe entre 6 et 7, soit dans un sol presque neutre, légèrement acide. Il faut remarquer que certaines espèces végétales ont des exigences de croissance particulières. Un terrain acide peut être favorable au développement des plantes ayant des besoins en fer plus élevé. C'est le cas des conifères qui poussent davantage dans des sols plus acides.

**Tableau 4 :** Valeurs repères du pH pour définir le caractère acide, neutre ou basique des sols<sup>14</sup>

Sol acide	< 6,8
Sol neutre	de 6,8 à 7,2
Sol alcalin	> 7,2

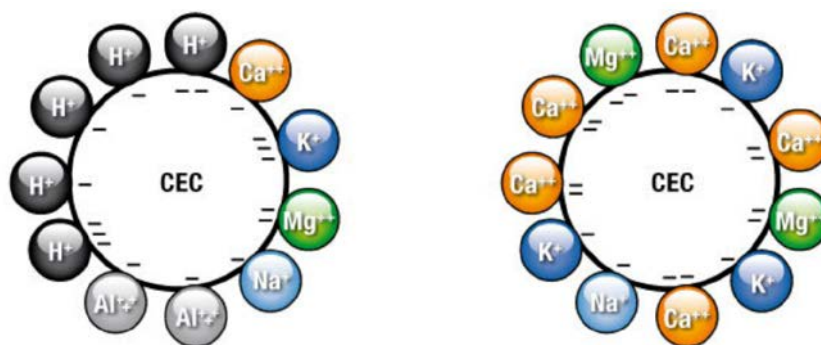
Le pH varie en fonction de la teneur du sol en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), en sels minéraux et en matières organiques. Il joue **un rôle essentiel dans l'activité microbiologique du sol**, dans l'approvisionnement des plantes en eau et dans l'absorption des nutriments par les racines.

**Tous les éléments nutritifs du sol sont plus assimilables dans des pH qui s'approchent de la neutralité.** Le meilleur exemple est le **phosphore**. Dans les sols acides, le phosphore se complexe avec le fer et devient insoluble. Dans les sols basiques, il se complexe avec le calcaire. Il peut donc avoir du phosphore dans le sol, mais ce phosphore est non-prélevable par les racines. Il devient soluble, et donc assimilable, dès que le pH est ajusté vers la neutralité. **Faire un apport de phosphates sur un sol acide ou basique est donc une perte puisque les phosphates se rétrogradent assez rapidement**<sup>15</sup>. La stabilité structurale est également meilleure vers un pH neutre.

Il est impossible de gérer la fertilité chimique d'un sol sans gérer le pH en même temps !

14 Note : Les termes «acide» et «basique» sont également utilisés pour décrire les roches ou le matériau parental des sols, mais il ne fait pas référence au pH de la matière. En géologie, ces termes se rapportent à la quantité de silice présente par rapport à celle du Mg, Fe et Ca (ex : le granite est une roche acide, alors que le basalte est une roche dit basique, ou mafique).

15 La rétrogradation est liée au pH et à la teneur en calcium. Lors d'un apport (ex : chaulage), le phosphore peut passer d'un état soluble à solide, indisponible pour la plante. Ce phénomène de rétrogradation dépend de divers facteurs : il est plus important dans les sols calcaires ou acides. Le phénomène s'intensifie avec une température élevée et une faible teneur en matière organique.



Sol acide

Sol neutre

Figure 26 – Comparaison entre un sol acide et un sol neutre (source : Unifa)

### Acidification du sol

**La tendance naturelle d'un sol est à l'acidification :** les cations minéraux sont remplacés par des ions  $H^+$  (ce point sera détaillé au chapitre 4). Cela s'explique par plusieurs paramètres et notamment le fait que certains sols soient plus réceptifs naturellement aux ions  $H^+$ . C'est notamment le cas des sols argileux, qu'il sera difficile de changer. On parle alors de pouvoir tampon du sol, soit une résistance importante aux variations de pH. Il faut aussi évoquer le calcium: si le sol se décalcifie - les causes sont variables -, les ions  $Ca^{2+}$  laissent de la place pour les ions  $H^+$  et le sol s'acidifie peu à peu. **Sous certaines conditions climatiques, les sols ont aussi tendance à s'acidifier.** Ajoutons un paramètre: l'engrais. Certains engrais amènent l'acidité, spécifiquement s'ils contiennent de l'ammoniaque, des nitrates ou des phosphates.

**L'acidification d'un sol peut conduire à une certaine toxicité.** Contrairement aux éléments nutritifs, les métaux sont plus solubles et donc assimilables à des pH acides. L'exemple le plus courant est une toxicité par l'aluminium (Al). Plus le pH est faible, plus les  $H^+$  et  $Al^{3+}$  sont sur les sites échangeables et plus le risque de toxicité est important. Dans le même temps, il y a moins de  $Ca^{2+}$  favorable à une bonne structure.

### Pouvoir tampon du sol

**Le pouvoir tampon du sol** intervient dans la stabilisation du pH du sol, c'est-à-dire de son acidité. Selon leur composition et leur nature minérale, les sols davantage basiques peuvent réagir aux changements de pH en neutralisant l'acidité. Cette réaction chimique se nomme «effet tampon». Par exemple, un sol calcaire contient une bonne proportion de carbonate de calcium, un minéral basique. Il est donc en mesure de neutraliser chimiquement les acides. Les variations de pH, dans ce type de sol, seront donc moins importantes. La capacité tampon (ou le pouvoir tampon) d'un sol est défini par sa capacité de résister à des variations de pH; c'est la faculté de résister aux changements de pH lorsqu'on ajoute des composés acides ou basiques. L'effet tampon résulte de l'équilibre entre des substances qui libèrent des protons ( $H^+$ , les acides) et des substances qui capturent des protons (les bases). Le sol contient du dioxyde de carbone, des sels minéraux et des matières organiques capables de réduire l'acidification (due aux engrais chimiques par exemple) par la neutralisation. C'est à travers **le complexe argilo-humique qu'il y a une régulation du pH.** Il est porteur de charges négatives et c'est donc un lieu d'échanges avec les cations ( $H^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ...) présents dans la solution du sol.



### 1.3.3. Les propriétés biologiques des sols

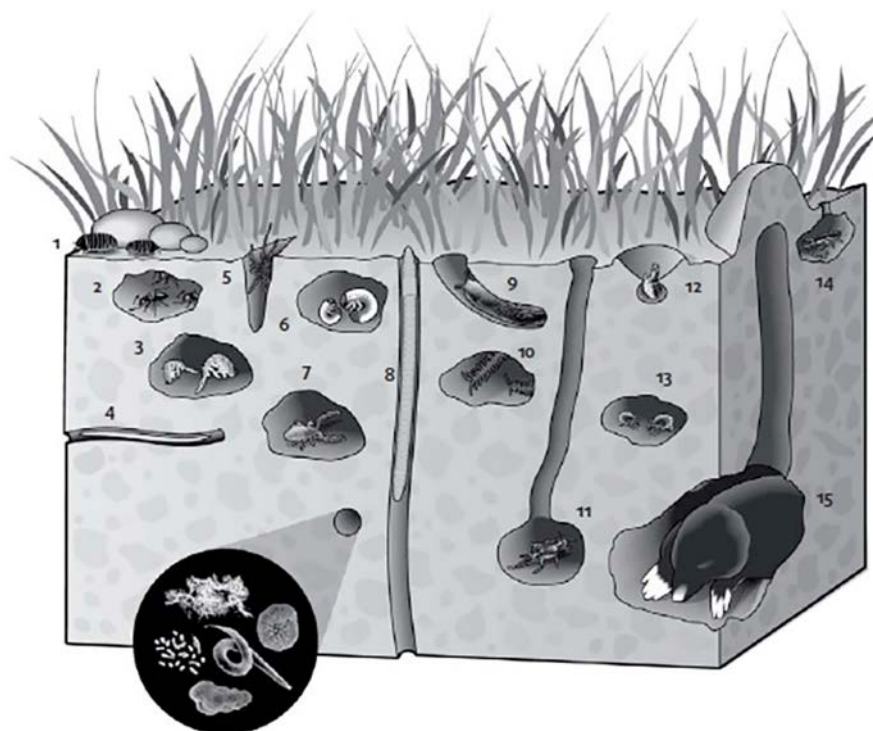
#### 1.3.3.1. Le rôle crucial des nombreux organismes du sol

Plusieurs fonctions dépendent de l'activité biologique : **les transferts des nutriments** du sol à la plante, la **dissolution des minéraux** issus de la roche mère, la **minéralisation des matières organiques**, la **stabilisation de la structure** du sol par la synthèse des substances organiques, la **cohésion des agrégats** et la **formation de galeries** pour aérer et créer de la porosité.



L'activité biologique a donc des conséquences directes sur les propriétés physiques et chimiques des sols. Les interactions entre les (micro)organismes du sol et leurs « liens trophiques » sont complexes.

La **diversité biologique dans le sol est immense**. On considère que 25% de la biodiversité terrestre serait dans les sols et que seul 10% des microorganismes du sol seraient connus. La microfaune (taille < 0,2 mm comme les protozoaires, nématodes, rotifères, tardigrades) et la microflore (bactéries et champignons) représenterait **plus de 3,5 tonnes/ha de biomasse**. On ne compte pas moins de 260 millions d'individus par m<sup>2</sup> de sol ; soit une masse globale équivalente à 12 vaches adultes par hectare.



**Figure 27** – La vie dans le sol (selon l'Atlas africain des sols, 2015). Les ouvriers de l'usine à vie sous le microscope : bactéries, nématodes, mycéliums, protozoaires. Plus : 1. Cloportes ; 2. Fourmis ; 3. Collemboles ; 4. Ver de terre ; 5. Araignée ; 6. Larves de hanneton ; 7. Pseudo-scorpion ; 8. Ver de terre de profondeur ; 9. Limace ; 10. Myriapodes ; 11. Grillon ; 12. Larve de fourmi-lion ; 13. Acariens ; 14. Perce-oreille ; 15. Taup (source : (Atlas africain des sols).

Les sols africains contiennent **un éventail extraordinaire de taxons et d'espèces de différentes tailles**, populations et activités. Certains animaux compensent leur petite taille par le nombre. Les animaux tirent profit du sol de bien des façons. Pour eux, c'est un abri, une zone de reproduction, un dépotoir, une source de nourriture (animale et végétale), un complément alimentaire (géophagie) et un élément d'hygiène (bains de poussière et de boue). Selon l'utilisation qu'ils font du sol, les animaux peuvent modifier ses caractéristiques. Le mélange des particules du sol (bioturbation), la décomposition de la matière organique et le cycle des nutriments dépendent pour beaucoup de l'activité biologique (Atlas africain des sols).

La biologie du sol c'est :

- Plus de 4000 génotypes bactériens (décomposition, production)
- Plus de 2000 espèces de champignons saprophytes (décomposition, production)
- Environ 1000 espèces d'invertébrés, dont :
  - Des mollusques et des insectes (premiers stades de décomposition de la litière et de transformation de la matière organique)
  - 15 espèces de diplopodes (myriapodes plus connus sous le nom de « mille-pattes »)
  - 10 à 12 espèces de vers de terre de divers types (épigés, ceux qui vivent à la surface du sol dans la litière ; anéciques, ceux qui creusent des galeries en profondeur ; endogés, ceux qui creusent des galeries horizontales dans le sol)
  - 20 à 30 espèces d'Enchytraeidae (une famille de vers de terre translucides ou blancs, minuscules, parfois presque invisibles).
  - 400 à 500 espèces d'acariens
  - 60 à 80 espèces de collembolles (dissémination de la microflore et transformation)
  - 90 espèces de nématodes (régulation des champignons, dissémination des bactéries,...)
  - 60 espèces de protozoaires (amibes, vorticelles).

La biologie joue un rôle crucial dans le fonctionnement des sols et à la base des nombreux services rendus par les sols :

- **Recyclage des nutriments** : cycles de fixation et de transformation (N, P, K)
- **Transformation du carbone** : contribution essentielle à l'humification (stockage du carbone)
- **Maintien de la structure du sol** : rétention en éléments nutritifs et en eau grâce aux agrégats formés
- **Régulation des populations biologiques**, et notamment des bioagresseurs (destruction des formes de conservation des ennemis et des maladies des plantes telles que les sclérotés, kystes de nématodes, larves et pupes, etc.).

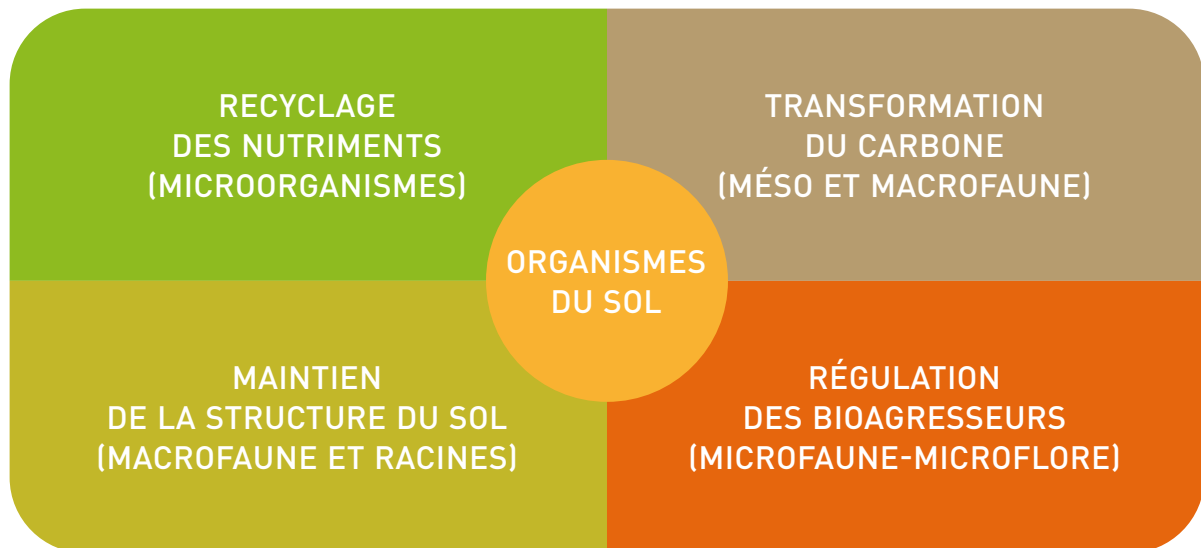


Figure 28 – Importance de la biologie du sol : rôle des divers organismes du sol.

Les différents compartiments du sol vivant ont diverses fonctions, qui assurent le bon fonctionnement de celui-ci. Ainsi, **les bactéries sont des régulatrices essentielles des équilibres gazeux et des cycles biogéochimiques du sol**. Les champignons transportent des quantités importantes d'eau et de substances, participent à la dégradation de la litière et à sa transformation en humus.

Quant à la faune du sol, son rôle fondamental réside dans la transformation de la matière organique et dans son action mécanique sur les sols : formation de galeries, porosité, structuration des agrégats. En creusant et en nichant, des animaux comme les termites, les fourmis, les vers de terre, les taupes, les rongeurs, les mangoustes, les oiseaux et même des herbivores de grande taille, mélangent et aèrent les couches du sol. Ils créent des passages qui facilitent l'infiltration de la pluie et, par digestion directe et par décomposition de la litière, ils favorisent le recyclage et la minéralisation des nutriments. En fait, de nombreuses espèces apportent de la matière organique depuis la surface et la déposent en profondeur dans le sol. Les effets sur la porosité, l'aération, la capacité de rétention en eau, le drainage, la densité apparente, l'érodabilité et la teneur en nutriments du sol sont essentiels, écologiquement et économiquement parlant. En effet, des populations florissantes d'invertébrés et de microorganismes sont considérées comme la base d'un sol sain (Atlas africain des sols).

Les organismes du sol ont des « liens trophiques » qui sont complexes :

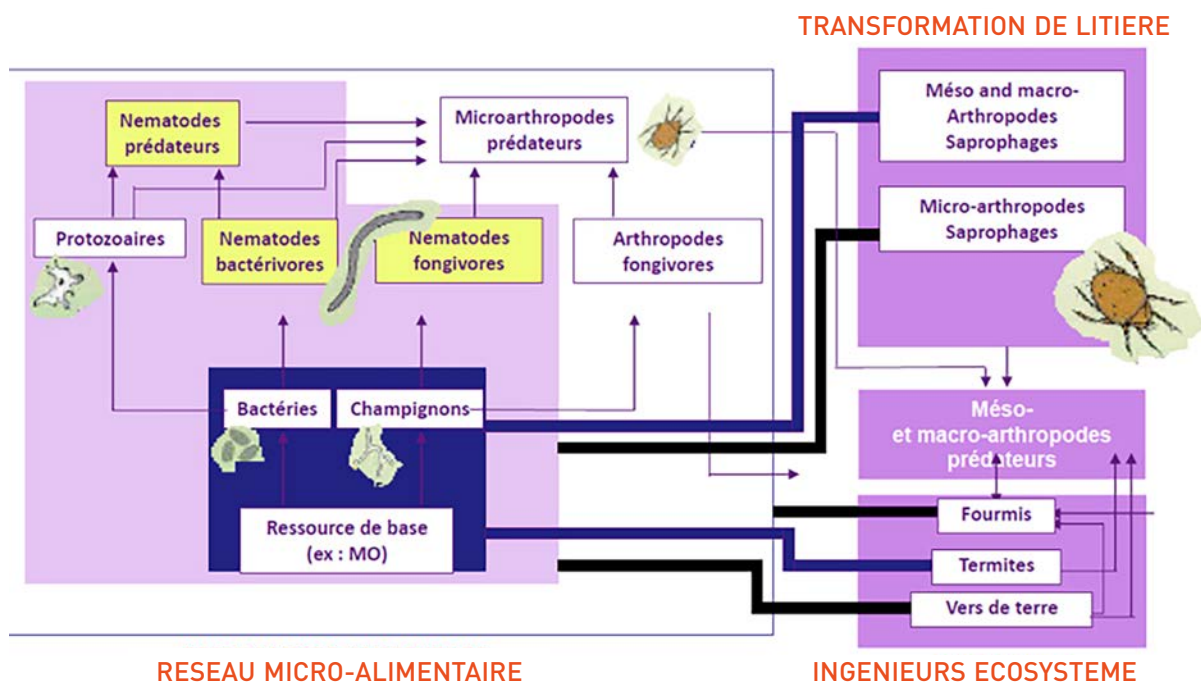


Figure 29 – Liens trophiques complexes entre les divers organismes du sol (la ressource de base est la matière organique, MO)

Ces interactions biologiques procurent au sol une propriété d'auto-structuration, qui s'exprime à différentes échelles, allant des films microbiens jusqu'aux macro-galeries des vers de terre. Les invertébrés du sol étant qualifiés alors de groupe clé de l'organisation et du fonctionnement des sols, on parle alors d'« organismes ingénieurs ». La contribution de ceux-ci est multiple : incorporation de la litière au sol, protection des plantes contre certains bioagresseurs, activation sélective de l'activité microbienne, création de structure favorable à la vie du sol (incubateurs de microorganismes). En bref, l'activation biologique de certains groupes vise à dynamiser l'ensemble du système et améliorer son fonctionnement et sa production primaire. Comprendre les relations biologiques du sol peut avoir une grande importance pratique. Dans la réhabilitation des terres détruites par l'exploitation minière, le plus gros problème consiste à trouver les moyens de réduire la compaction du sol. La restauration est vouée à l'échec si elle se borne à la revégétalisation sans rechercher aussi les moyens de repeupler le sol avec une gamme d'animaux auto-suffisants, de petite et de grande taille. En agriculture, la pratique de techniques culturales de conservation implique qu'une importante population d'organismes capables d'effectuer un bio-labour soit présente

Il est dès lors facile de comprendre que **cet équilibre peut être facilement détruit soit par des travaux agricoles agressifs** (ex : le labour, l'irrigation, l'excès d'engrais qui stimule les bactéries du sol accélérant la minéralisation, le traitement des semences ou du sol, etc.) ; **soit par l'apport de produits toxiques** pour les populations de microorganismes ou la faune du sol (ex : pesticides ou polluants atmosphériques ; lisiers, purins, etc.). La (micro)faune du sol est aussi très sensible aux conditions



météorologiques: elle disparaîtra ou migrera vers les couches inférieures en cas de pluies répétées ou d'exposition forte et répétée au soleil, ne mettant plus à disposition les minéraux nécessaires aux cultures à faible système racinaire. **Le retour à l'équilibre biologique des sols s'avère souvent lent et délicat.**

Bien que les organismes du sol ne soient pour la plupart pas visibles, il est absolument prioritaire de les protéger car les efforts qui sont faits pour préserver la vie du sol sont permettent de préserver les espèces végétales et animales qui vivent en surface (Atlas africain des sols).

### 1.3.3.2. Les bactéries fixatrices d'azote dans le sol

Parmi les rôles les plus importants de la biologie du sol, il y a la capacité de certaines bactéries à capter de l'azote. L'azote présent dans le sol est sous une forme  $\text{NO}_3^-$  (les nitrates du sol) et l'azote présent dans l'air est sous forme  $\text{N}_2$  (l'azote atmosphérique). Pour pouvoir être absorbé par la plante, l'azote présent dans l'atmosphère sous forme  $\text{N}_2$  doit subir des processus de transformation biologique réalisé par des micro-organismes appelés **bactéries fixatrices d'azote** (ex: *Azotobacter*, bactéries libres présentes dans le sol en quantité importante au niveau de la rhizosphère, à proximité des racines des plantes ou encore *Rhizobium*, bactéries qui se trouvent dans des nodosités sur la racine des légumineuses). Ces bactéries fixatrices d'azote ont pour fonction principale de **capter l'azote présent dans l'air, mais aussi dans le sol** (limitant ainsi les pertes dans les nappes), et de le restituer à la plante sous une forme disponible et assimilable.

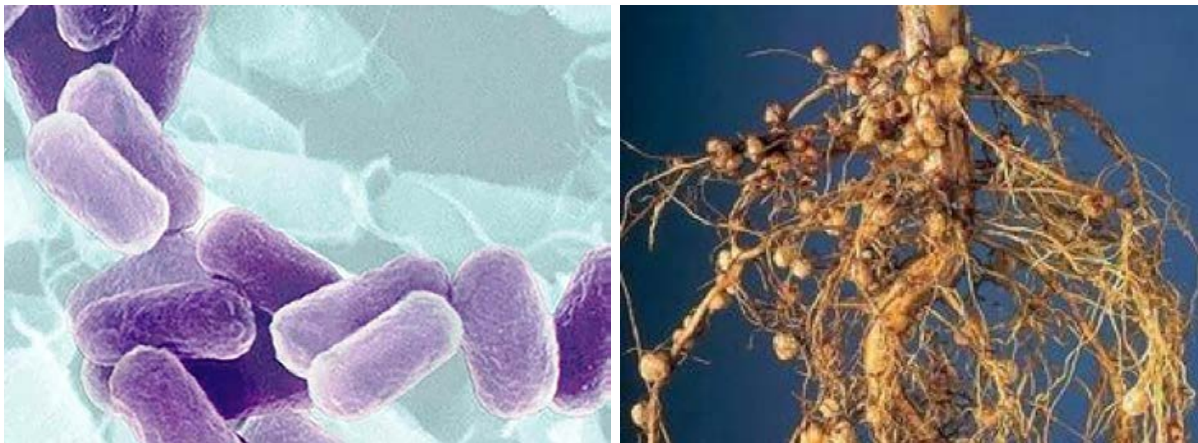


Figure 30 - *Azotobacter* (à gauche) et nodules de *Rhizobium* sur les racines (à droite)

Une fois fixé aux bactéries, l'azote non assimilable est «transformé» puis restitué dans le sol sous une forme parfaitement assimilable par les cultures, à savoir sous forme  $\text{NO}_3^-$  ou  $\text{NH}_4^+$  (ammonium). **Seules ces formes nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) peuvent être absorbées par la plante** au niveau racinaire. Une fois absorbées par la végétation, elles sont transformées en composés organiques, **principalement des protéines**, des bases des acides nucléiques et de la chlorophylle. Puisque les formes minérales de l'azote sont hautement solubles et mobiles dans les sols, une partie est exportée par le ruissellement et la percolation vers le réseau hydrologique. Les formes ioniques de l'azote sont facilement solubles et donc très mobiles. Une quantité importante d'azote est ainsi transportée vers les cours et les nappes d'eau !

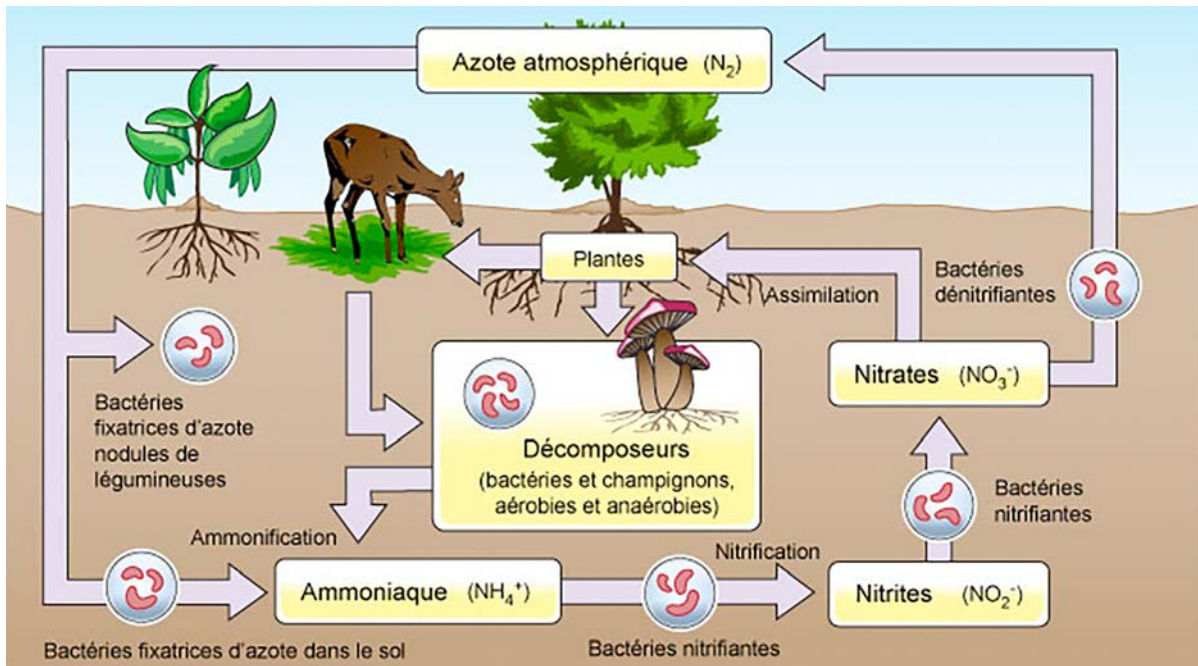


Figure 31 - Processus microbiens impliqués dans le cycle de l'azote au niveau du sol (source : EPA).

Durant la **décomposition** de matière organique, les procédés chimiques inverses se produisent. En milieu anoxique (peu d'oxygène dissous), des bactéries dénitrificatrices réduisent les nitrates et nitrites en azote moléculaire ( $N_2$ ) qui est retourné vers l'atmosphère. À travers d'autres processus bactériens, le nitrate est réduit en nitrite et de là en ammoniac ou en dioxyde d'azote.

## 1.4. LES PRINCIPALES FONCTIONS DU SOL

Le sol n'est pas qu'un « substrat » qui sert de support aux plantes. Le réduire à cette simple et unique fonction serait une erreur. En tout premier lieu, le sol participe au cycle des éléments nutritifs, au stockage de l'eau et du carbone, à la régulation du climat et des bioagresseurs, ainsi qu'à la conservation de la biodiversité globale.

Mais en outre, le sol a bien d'autres fonctions sur lesquelles nous ne nous attarderons pas. Le sol est une source de matières premières pour la construction (comme les briques en argile cuite ou crue), pour réaliser des ustensiles de cuisine (comme les pots en terre cuite), pour l'extraction d'énergie ou de minerais, etc. (voir l'Atlas africain des sols pour plus d'information).

### 1.4.1. Support pour la production des plantes

Les sols servent de support aux plantes qui, après avoir capté le  $CO_2$  de l'atmosphère pour leur photosynthèse, y trouvent l'eau, l'oxygène et les éléments minéraux (nutriments), dont elles ont besoin pour croître. Le sol stocke, contrôle la libération et assure le renouvellement des nutriments et des autres éléments essentiels. Au cours de ces processus biochimiques, à l'instar du cycle de l'eau, les nutriments peuvent être transformés en éléments facilement disponibles pour les végétaux,

stockés dans le sol, ou même libérés dans l'air ou dans l'eau. Ceux-ci se divisent en **macronutriments** (les 20 éléments les plus importants, N, P, K Ca, Mg, S en particulier) et une quinzaine de micronutriments, nécessaires, mais à de très faibles concentrations (**oligoéléments**).

Les végétaux prélèvent les nutriments dans le sol par un processus appelé échange cationique qui dépend de l'humidité du sol et de la lumière. Lors de la photosynthèse, les poils très fins qui recouvrent les racines des végétaux pompent les ions  $H^+$  de l'eau du sol. Ces ions déplacent les cations chargés positivement (à savoir, les nutriments) qui sont retenus sur les particules chargées négativement du sol et de la matière organique. Lorsque ces cations sont présents dans la solution du sol, la différence d'énergie potentielle entre l'eau du sol et les racines déplace les nutriments du milieu plus concentré (sol) vers le milieu moins concentré (végétal).

Le sol joue donc un rôle de garde-manger, plus ou moins grand et plus ou moins rempli. Une déficience de certains éléments peut occasionner des symptômes de carence chez les végétaux, tandis qu'à des niveaux plus élevés ces mêmes éléments peuvent se révéler toxiques. À l'inverse, l'abondance d'un nutriment peut entraîner la déficience d'un autre. Les sociétés humaines, qui se nourrissent des plantes et des animaux, sont totalement dépendantes des sols.

#### 1.4.2. Le rôle des sols comme puits de carbone et dans le recyclage de la matière organique

L'une des fonctions les plus importantes du sol est le rôle qu'il joue dans le cycle du carbone (C) terrestre en facilitant la conversion du dioxyde de carbone atmosphérique ( $CO_2$ ) en matière vivante, puis son catabolisme et sa libération dans l'environnement. La biologie joue un rôle important dans les mouvements du carbone entre le sol et l'atmosphère. Le sol représente **un des puits de carbone le plus important au monde** (à côté des océans et des forêts).

**Un puits de carbone est un réservoir** qui stocke, par un mécanisme naturel ou artificiel, le carbone atmosphérique. Les principaux puits de carbone sont les océans mais aussi les sols (par l'humus qu'ils contiennent), les forêts en formation, les tourbières, etc. Le principal mécanisme de séquestration du  $CO_2$  atmosphérique est la photosynthèse (propre aux bactéries photosynthétiques et aux végétaux). Cette voie métabolique utilise l'énergie solaire pour fixer le  $CO_2$  sous forme de matière organique. La biosphère absorbe aujourd'hui environ 20% du carbone anthropique émis dans l'air. Le carbone est ainsi « piégé » dans de la matière vivante, puis par la suite plus ou moins durablement séquestré dans de la matière organique morte ou dans une roche « biogénique ». La biomasse organique présente dans le sol constitue donc un stock de carbone.<sup>16</sup> En effet, tous les débris végétaux, animaux ou microbiens qui arrivent sur le sol se décomposent sur une durée **de quelques mois à quelques années en moyenne pour se transformer en humus**. On n'imagine pas ce que serait la planète sans cette fonction essentielle d'élimination des déchets. Ce faisant, les sols relâchent ainsi du  $CO_2$ , en sorte que, **à la fois source et puits de**

<sup>16</sup> <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/rechauffement-climatique-puits-carbone-sont-ils-fonctionnent-ils-1212/>

carbone, ils participent à la régulation climatique du globe. Les nutriments qu'ils contenaient sont ainsi progressivement remis en circulation, tandis que des matières organiques stables (l'humus) se stockent progressivement dans les sols.

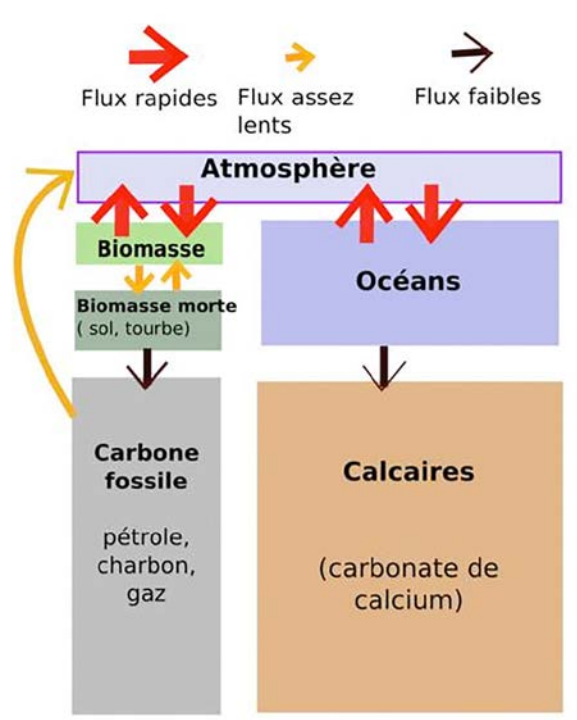


Figure 32 - Représentation schématique des échanges gazeux

En contribuant à diminuer la quantité de  $\text{CO}_2$  atmosphérique, les puits de carbone influent sur le climat planétaire et donc sur toutes les composantes de l'environnement qui dépendent du climat<sup>17</sup>.

Selon la FAO (2002), le carbone organique du sol représente le plus grand réservoir en interaction avec l'atmosphère et est estimé par entre 1 500 et 2 000 Pg C à 1 m de profondeur (2 456 à 2 m de profondeur environ). La quantité de carbone organique stockée dans la couche superficielle du sol est estimée à 700 Gt (gigatonnes ou milliards de tonnes) au niveau mondial<sup>18</sup>. Le carbone inorganique représente à peu près 750 Pg, mais il est capturé dans des formes plus stables comme les carbonates. La végétation (650 Pg) et l'atmosphère (750 Pg) emmagasinent considérablement moins que les sols. Les flux entre le carbone terrestre ou le carbone organique du sol et l'atmosphère sont importants et peuvent être positifs (séquestration) ou négatifs (émission de  $\text{CO}_2$ ). En Afrique, les émissions de carbone dues aux défrichements et au brûlis sont largement supérieures aux émissions dues à la combustion de carburants fossiles (ex: pétrole et gaz). Même si les incendies des savanes touchent de vastes régions, les émissions de  $\text{CO}_2$  qui émanent de la combustion sont compensées par la repousse de la végétation. Dans l'ensemble, l'Afrique émet chaque année légèrement plus de carbone qu'elle n'en séquestre.

17 [https://fr.wikipedia.org/wiki/Puits\\_de\\_carbone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Puits_de_carbone)

18 <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/272/1122/matiere-organique-sols-stockage-carbone.html>



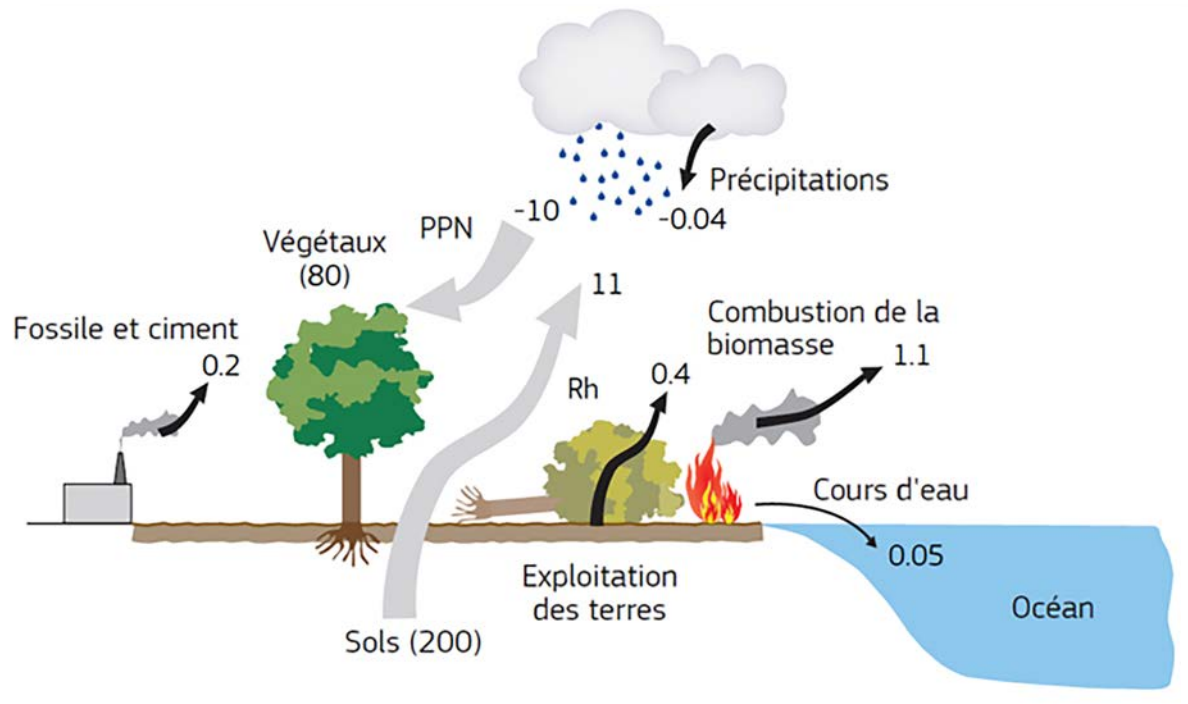


Figure 33 - Le cycle du carbone en Afrique (avec PPN = productivité primaire nette ; Rh = respiration microbienne) (source : Atlas africain des sols)

En Afrique (figure 33), le sol constitue donc de loin le plus gros réservoir, avec environ 200 Gt de carbone tandis que la végétation représente environ 80 Gt. Avec 11 Gt de carbone, les sols sont également le plus gros émetteur de carbone en Afrique, principalement en raison de la respiration microbienne ou et de la décomposition de la matière organique. Toutefois, cette quantité est quasi compensée par la productivité végétale (productivité primaire nette).

Le stockage du carbone dépend essentiellement du type de sol et de son occupation. Dans le passé, le développement de l'agriculture a été la cause principale de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, mais à l'heure actuelle la combustion du carbone fossile (6,5 Pg) par l'industrie et les transports représentent la contribution principale (FAO, 2002). Les stocks les plus faibles sont observés sous culture permanente (34 t/ha) et dans quelques zones de cultures très intensives. Les stocks moyens se rencontrent dans les sols des terres arables (environ 60 t/ha), comme par exemple dans les grandes plaines de cultures intensives. Enfin, les stocks de carbone organique les plus élevés (entre 80 et 90 t/ha) sont observés dans les sols de prairies, dans les forêts et les milieux à végétation arbustive et/ou herbacée.

**Les stocks sont faibles sous cultures maraîchères fortement intensifiées.** La suppression du labour permet d'accroître le stockage du carbone de 0,2 t C/ha/an. L'agroforesterie permet d'augmenter significativement le stockage du carbone par exemple par l'intégration de légumineuses assurant la disponibilité en azote.

La **matière organique des sols** a un rôle important dans la stabilité de leur structure (effet anti-érosion), l'entretien de micro-organismes et d'invertébrés favorable aux plantes et le stockage et la libération lente des nutriments essentiels à toutes les formes de vie. La quantité de matière organique dans le sol est déterminée par un équilibre entre les apports biologiques (par ex., les résidus végétaux), la vitesse

de formation de l'humus et sa perte, à savoir la décomposition de la végétation et la minéralisation de l'humus. En fonction du climat et de l'utilisation des terres, la matière organique peut rester stable pendant de longues périodes. Toutefois, le niveau de matière organique dans le sol peut être modulé en faisant varier les conditions d'apports ou de pertes. Plusieurs pratiques culturales, comme la récolte des cultures ou le drainage, extraient du carbone du sol. Les façons culturales sans labour ou avec labour minimal, le paillage de résidus végétaux, la rotation des cultures et les cultures intercalaires de vivaces améliorent la formation et le stockage de la matière organique dans les sols. Il est en général admis que la matière organique contient entre 40 et 60% de carbone (en % du poids sec).

Le stock de carbone organique présent dans les sols naturels présente un **équilibre dynamique** entre les apports de débris végétaux et la perte due à leur décomposition. Dans les conditions normales d'aérobic des sols, la majorité du carbone apporté est labile et **seulement une petite fraction de ce qui entre dans le sol s'accumule** dans la fraction stable qu'est la fraction humique.

De faibles niveaux de carbone organique sont généralement néfastes pour la fertilité et la capacité de rétention de l'eau du sol, et tendent à augmenter la vulnérabilité du sol à la compaction, ce qui entraîne une augmentation du ruissellement des eaux de surface et de l'érosion.

Les changements d'utilisation des terres modifient les stocks moyens de carbone. En passant d'une forêt à des prairies ou à des cultures, on assiste à des émissions nettes de CO<sub>2</sub>, alors que le boisement ou le retour à la prairie de terres cultivées conduisent à des absorptions nettes de carbone, donc de CO<sub>2</sub>. Sous climat équatorial, le remplacement de la forêt par les cultures fait baisser le C du sol de 43 à 25 T/ha en 15 ans, les apports passant de 11 à 2 t/ha. La mise en culture cause la perte de matière organique par oxydation et érosion, entraînant la capacité à fournir des nutriments et à retenir les cations assimilables.

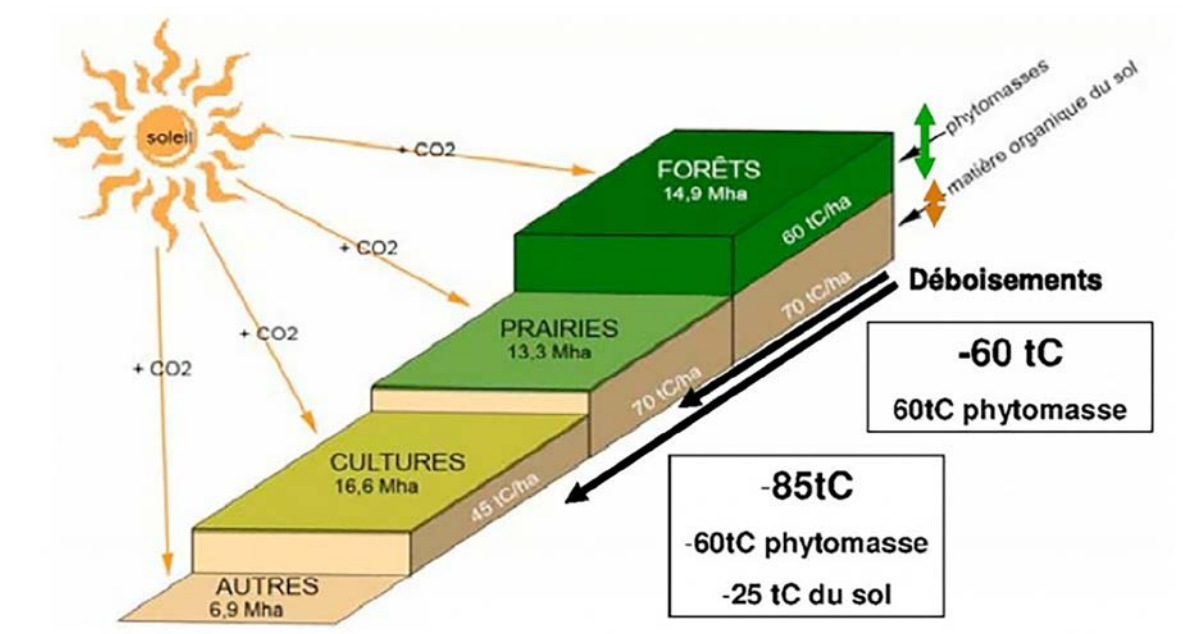


Figure 34 - Stocks moyens de carbone par hectare dans les biomasses végétales et dans les matières organiques des sols dans divers écosystèmes (Rapport ADEME, Riedacker 2006).

### 1.4.3. Stockage et épuration de l'eau<sup>19</sup>

L'eau est essentielle à la survie de presque tous les organismes vivants et le sol joue un rôle prépondérant dans le cycle hydrologique mondial. La majeure partie des précipitations est interceptée par la végétation ou tombe directement sur la surface du sol. L'eau s'égoutte des feuilles ou coule le long des tiges et des troncs vers le sol. En fonction de divers facteurs comme l'humidité, la texture, la teneur en matière organique et la structure du sol ainsi que la pluviométrie, les eaux de pluie peuvent :

- imbiber le sol où elles peuvent être stockées pour être utilisées par les végétaux ;
- s'infiltrer par percolation dans le sol afin de recharger nappes phréatiques et aquifères ;
- s'écouler horizontalement ou latéralement dans le sol et alimenter rivières, lacs ou sources ;
- être interceptées par les racines poussant dans le sol.

Le sol peut réguler le drainage, la circulation et le stockage des eaux et des solutés. Le sol répartit l'eau pour la recharge des eaux souterraines et l'alimentation des végétaux et des animaux du sol. La battance du sol peut détruire cette capacité et provoquer ainsi des inondations mortelles et destructrices. Le sol agit aussi comme un filtre protégeant la qualité de l'eau, de l'air et des autres ressources. Les composés toxiques ou les nutriments en excès peuvent être dégradés ou bien rendus indisponibles pour les végétaux et les animaux.

Les plantes ne sont capables d'utiliser que l'eau du sol qui entre **en contact direct avec leurs racines**. En général la répartition des racines est concentrée à proximité de la surface. Les plantes dont la densité racinaire par volume de sol est élevée sont capables d'absorber la totalité de l'eau disponible. Mais les légumes qui ont une densité racinaire est faible ne captent pas autant d'eau à partir d'un même volume de sol. Par conséquent, les légumes sont généralement plus sensibles au stress hydrique que des cultures de densité racinaire élevée comme le maïs.

i

19 Voir aussi COLEACP, Manuel sur la Gestion durable de l'eau, chapitre 3.

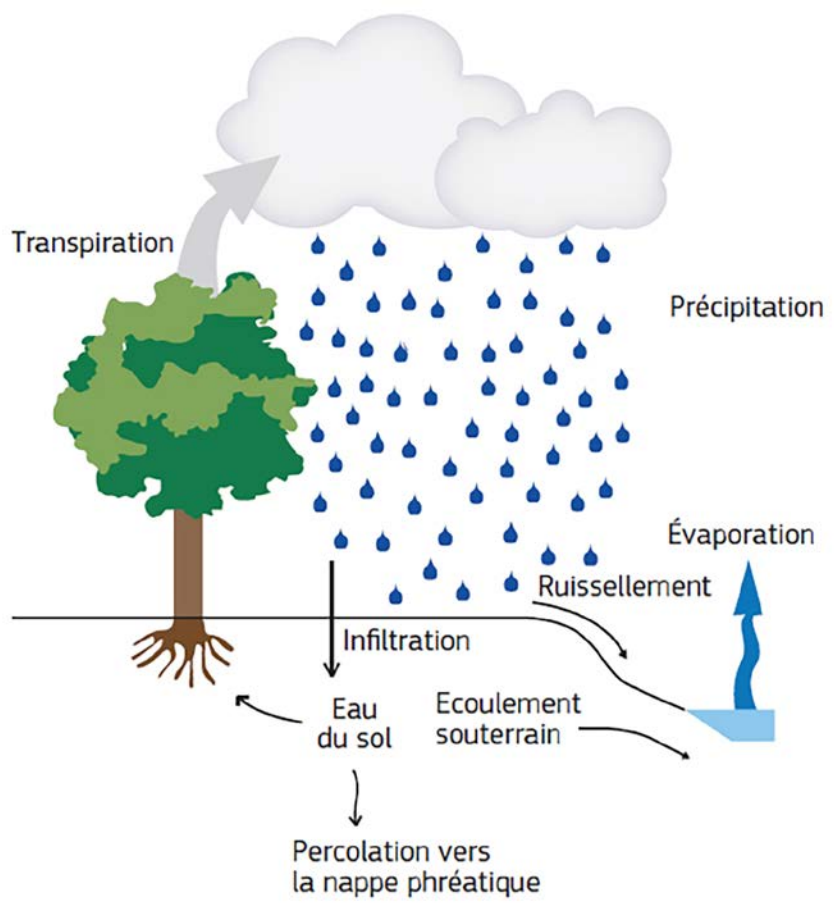


Figure 35 – Cycle hydrologique et rôle du sol pour le stockage et l'épuration de l'eau  
(source : Atlas africain des sols)

#### 1.4.3.1. Stockage de l'eau dans le sol

L'eau s'infiltré et se stocke dans la porosité qui peut représenter 50% du volume du sol dans les 20 premiers centimètres. Les racines des plantes pompent cette eau (évapotranspiration) et la chaleur du soleil est responsable d'une évaporation de l'eau qui remonte à la surface par capillarité.

En fonction de leur taille, les pores du sol exercent un degré variable de rétention de l'eau, qui détermine sa disponibilité pour les plantes :

- **l'eau libre ou de gravitation**, occupe la macroporosité du sol ; elle est facilement absorbable par les végétaux, mais ne séjourne que peu de temps dans ce compartiment qu'elle quitte sous l'action de la pesanteur. Il s'agit du phénomène de « ressuyage » du sol qui conduit à l'évacuation plus ou moins rapide de l'eau de la macroporosité. L'eau, remplacée par l'air, est rendue de ce fait relativement inaccessible aux végétaux. Elle n'entre donc généralement pas dans les estimations de la réserve en eau du sol.
- **l'eau capillaire**, occupe la microporosité du sol. L'eau capillaire est retenue dans le sol par capillarité et le sol atteint un seuil d'humidité caractéristique dénommé « **capacité au champ** ». Cette eau n'est que partiellement disponible pour les végétaux et le sera d'autant moins que la taille des pores diminue.



- l'**eau hygroscopique ou pelliculaire**, entoure les particules solides du sol; elle n'est pas disponible pour les plantes.
- l'**eau de constitution**, indisponible, est contenue dans les particules solides du sol; elle n'est pas non plus disponible pour les plantes.

Un sol est dit « saturé » quand tous ses pores (micropores et macropores) sont remplis d'eau : les conditions sont alors asphyxiantes pour les racines.

### Capacité au champ

Une première partie de l'eau, apportée par la pluie ou par l'irrigation, percole tout de suite vers les profondeurs du sol, n'étant pas retenue par les forces capillaires : c'est l'**eau libre ou gravitaire**. Cette quantité est d'autant plus grande que la texture du sol est grossière (comme le sable). On obtient alors un sol (ressuyé) contenant le volume maximal d'eau qu'il peut retenir compte tenu de ses caractéristiques de porosité, perméabilité et granulométrie, sans pour autant que l'eau soit en excès et percole. Cette réserve d'eau est appelée la « **capacité au champ** ».

### Réserve en eau utile (RU) et point de flétrissement

La réserve utile en eau d'un sol (RU) est la quantité d'eau que le sol peut absorber et restituer à la plante. La RU est autrement dit la différence entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. La RU est composée pour 2/3 de RFU (Réserve Facilement Utilisable) et pour 1/3 de RDU (Réserve Difficilement Utilisable ou réserve de survie). Les plantes commencent par utiliser la RFU puis la RDU (elle diminue alors son activité d'évapotranspiration pour survivre) mais il arrive un moment où la force de rétention capillaire excède la force maximale de succion des racines (15 bars), c'est le **point de flétrissement permanent**, la plante meurt car l'eau devient inabsorbable par la plante. Le point de flétrissement est variable selon la capacité de succion des espèces végétales.

Plus la texture du sol est fine (argile < limon < sable) plus le point de flétrissement est élevé.

La différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement donne la réserve utile, selon la formule suivante :

$$RU = (HCC - HPFP) * DA * Z$$

Avec,

HCC = Humidité à la Capacité au Champ (en %)

HPFP = Humidité au Point de Flétrissement Permanent (en %)

DA = Densité Apparente du sol

Z = Profondeur d'enracinement en dm

**Tableau 30** : Valeurs moyennes de la réserve utile (RU) selon la texture des sols (sur 1m)

Pour un sol sableux	70 mm
Pour un sol argileux	180 mm
Pour un sol limon argileux	220 mm
Pour un sol de tourbe	350 mm

#### 1.4.3.2. *Épuration de l'eau qui s'infiltré à travers le sol*

Le sol a aussi un rôle d'épuration de l'eau. L'eau est filtrée et épurée par les activités microbiennes, puis transférée par de lents mouvements verticaux et transversaux vers les nappes phréatiques et les cours d'eau. L'infiltration efficace de l'eau dans les sols empêche le ruissellement et les inondations.

Le sol est un **milieu de transit, de stockage et de transformation** de très nombreuses substances quelles que soient leur nature, inorganiques ou organiques, résultant des processus naturels ou d'activités humaines. Les constituants des sols, leurs assemblages et les organismes vivants sont à l'origine de nombreux phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui déterminent la composition chimique des eaux qui circulent dans les nappes souterraines et dans les réseaux hydrographiques superficiels (Calvet, 2003).

#### 1.4.4. Réserve de biodiversité

Le sol est **une formidable usine à transformer et à faire naître du vivant**. Des milliers d'espèces (animales et végétales) vivent dans le sol. Parmi celles-ci, de nombreux microorganismes, invertébrés et bactéries qui forment **80% de la biomasse** vivant sur Terre. Chaque espèce joue son rôle de **transformateur des matières organiques et minérales** pour les rendre utilisables par les plantes, base de tous les écosystèmes terrestres.

Ces organismes remplissent de **multiples fonctions** qui favorisent la structure ou l'entretien du sol et la croissance des plantes. Les vers de terre et les termites en particulier y accomplissent des actions essentielles pour la construction de la structure et l'entretien de la porosité, la stimulation de la croissance des plantes et leur défense contre certains parasites.

Pour favoriser la vie du sol, il est nécessaire (*Directives volontaires pour la Gestion durable des sols*, FAO, 2017) :

- de préserver ou accroître la teneur en matière organique nécessaire à la biodiversité des sols ; d'apporter pour ce faire une couverture végétale suffisante (cultures de couverture, cultures multiples...) ainsi qu'une supplémentation en éléments nutritifs, afin d'assurer une concentration optimale de ceux-ci ;
- d'ajouter divers amendements organiques ;
- de limiter le plus possible la perturbation des sols ;
- d'éviter la salinisation ;

- de conserver ou restaurer la végétation (haies basses et haies brise-vent, par exemple) ;
- d'encourager le recours aux espèces de légumineuses fixatrices d'azote, aux inoculants microbiens, aux mycorhizes (spores, hyphes et fragments de racines), aux vers de terre et autres organismes bienfaisants pour les sols ;
- d'encourager la rotation des cultures.

La «fraction biologique» joue un rôle crucial dans le fonctionnement des sols et à la base des nombreux services rendus par les sols... mais cette biodiversité dans le sol est encore mal connue car peu emblématique et difficile d'accès. Il existe plus de 20 méthodes normalisées (méthodes ISO) pour caractériser la biomasse ou dénombrer les organismes du sol. Mais la difficulté est d'interpréter les résultats des comptages ou des mesures d'activité enzymatique par exemple. Quand un sol est-il « sain » et en « bonne santé biologique » ? Quand peut-on dire qu'il « fonctionne bien » ? C'est très difficile de s'en assurer, de poser un diagnostic. La recommandation générale à poser est d'avoir des observations de longue durée et répétées sur des sites de référence. Les bio-indicateurs habituels (ex: biomasses bactérienne et fongique, abondance des lombrics, diversité fonctionnelle des nématodes) sont complémentaires des analyses avec de nouveaux outils (techniques biochimiques, analyse d'ADN).

# Chapitre 2

## Fertilité et fertilisation des sols

2.1. La fertilité des sols	66
2.2. Comment apprécier la fertilité?	75
2.3. La fertilisation des sols et les éléments fertilisants	85
2.4. Rôle et nature des amendements du sol	108
2.5. Rôle de la phase aqueuse des sols dans la fertilité des sols	113
2.6. Annexes	116



## OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES

A l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- De comprendre les notions de fertilité, de fertilisant et d'amendement
- De définir la fertilité d'un sol, de connaître les éléments qui influencent cette fertilité et comment la gérer durablement
- De savoir comment on peut apprécier la fertilité d'un sol
- De comprendre le rôle des principaux éléments fertilisants (N,P,K et autres), leurs formes, leurs sources et le risque de perte de ces éléments
- D'identifier les principaux amendements du sol : nature et rôle de chaque type d'amendement (calcaire, magnésien, humifère, organique)
- De comprendre le rôle de la phase aqueuse du sol dans l'absorption par la plante des éléments fertilisants

## 2.1. LA FERTILITÉ DES SOLS

### 2.1.1. Définition du concept

La **fertilité d'un sol** est définie comme étant **son aptitude à soutenir la production des cultures** (et du bétail) (Sebillotte, 1989). Dans ce sens, fertilité et productivité sont synonymes. Un sol fertile est un substrat qui peut soutenir la croissance optimale des végétaux, de la germination de la semence à la maturité de la plante.

Ce soutien consiste principalement à fournir :

- un volume de sol adéquat pour le développement racinaire de la plante ;
- de l'eau et de l'air pour le développement racinaire et la croissance ;
- les éléments chimiques pour répondre aux besoins nutritionnels de la plante ;
- l'ancrage pour la structure végétale qui en résulte.

Ces attributs sont souvent utilisés pour décrire la « qualité productive » générale d'un sol agricole.

Une vision de la fertilité fondée sur les composantes physiques du milieu (nature du sol, climat, topographie, etc.) est **trop réductrice** car le sol n'est pas uniquement un assemblage d'éléments organiques et minéraux, mais **il est préférable de le considérer comme un « être vivant »** qui naît puis évolue sous l'influence de divers facteurs dont la (micro)faune, la (micro)flore, et surtout les pratiques agricoles et son usage par l'homme (Samake, 2007).

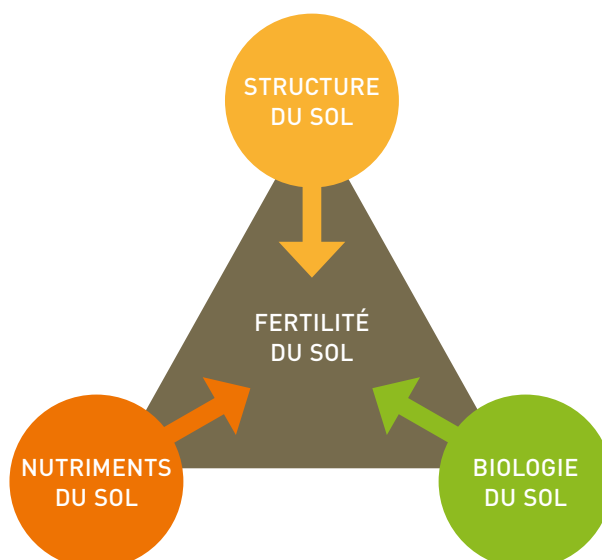


Figure 1 – Paramètres qui influencent la fertilité du sol

La fertilité du sol dépend de son origine (sols alluviaux, sols développés sur des différents types de roche mère), sa texture, sa structure, sa teneur en matière organique et de la gestion de cette fertilité par le producteur dans le passé (apport en engrais minéraux et organiques, précédents culturaux, etc.). Pour expliquer la fertilité des sols, on peut distinguer **deux types d'indicateurs** qui évoluent avec le temps et sont directement affectés par les pratiques agricoles :

1. Des *paramètres inhérents* de la qualité du sol: ils se rapportent aux caractéristiques du sol dans son état naturel et lui permettent de fonctionner correctement. Il s'agit de: la texture du sol, la profondeur et la roche-mère (minéralogie). Alors que **la texture** du sol ne change normalement pas au fil du temps (car elle dépend de sa composition), **sa profondeur peut diminuer suite à l'érosion** (provoquant un changement de la texture dans la couche supérieure du sol). Améliorer la texture d'un sol demande de gros moyens et est souvent quasiment impossible.
2. Des *paramètres dynamiques* de la qualité du sol: ils dépendent de la façon dont le sol est géré et comprennent **la structure** du sol, **la teneur en matière organique du sol** et **la capacité de rétention** de l'eau et des nutriments. Améliorer la structure est à la portée d'un agriculteur grâce à des pratiques culturales adaptées. Améliorer la teneur en matière organique ne peut être fait au bout d'une ou de deux campagnes, c'est un projet à long terme. Augmenter les stocks de phosphore (P) et de potassium (K) dans le sol au fil du temps est réalisable grâce à l'application d'engrais et de fumier animal (la matière organique apportée fournit des éléments nutritifs et augmente aussi la capacité de fixation des éléments nutritifs).

Il est pratiquement impossible de manipuler les caractéristiques inhérentes du sol par les méthodes de production habituelles. Par contre, **le maintien et même l'amélioration des paramètres dynamiques des sols est le principal objectif de la gestion durable des sols en agriculture**. Par exemple, il existe des possibilités pour les agriculteurs de gérer la matière organique du sol, et donc les propriétés biologiques qui y sont

associées, afin d'influencer la productivité de leurs sols agricoles. Ainsi, l'ajout régulier de matière organique permet de transformer un sol sableux en limon sableux, et un sol argileux en limon argileux, pour obtenir un des meilleurs sols de culture.

La gestion de la fertilité d'un sol doit viser à **l'utilisation optimale et durable** des réserves en nutriments dans le sol, des engrais minéraux et des amendements organiques. Pour la plupart des agriculteurs en Afrique subsaharienne, la gestion de la fertilité du sol est un facteur déterminant pour le maintien ou l'augmentation de leurs rendements et de leurs revenus. La façon de gérer cette fertilité non seulement peut déterminer le rendement de la campagne actuelle, mais elle peut aussi avoir un impact très significatif sur les rendements futurs.

### 2.1.2. Les facteurs qui conditionnent la fertilité physique du sol

De nombreux facteurs (climat, profondeur, texture, structure du sol, richesse en éléments nutritifs, activité biologique et autres), qui souvent interagissent entre eux, influencent la fertilité du sol, c'est-à-dire sa capacité à produire. Parmi ceux-ci certains (et particulièrement la teneur en matière organique du sol) ont aussi une influence sur la durabilité de cette fertilité.

#### 2.1.2.1. Le climat

Les facteurs climatiques qui influencent la fertilité des sols sont **la pluviosité** (quantité, ses variations et sa répartition annuelle) et **la température**. Le climat fournit en excès ou en défaut (très rarement à l'optimum) de l'énergie, du dioxyde de carbone, de l'eau et de la chaleur que le sol doit régulariser pour un bon développement et une bonne production des végétaux (Kintche, 2011).

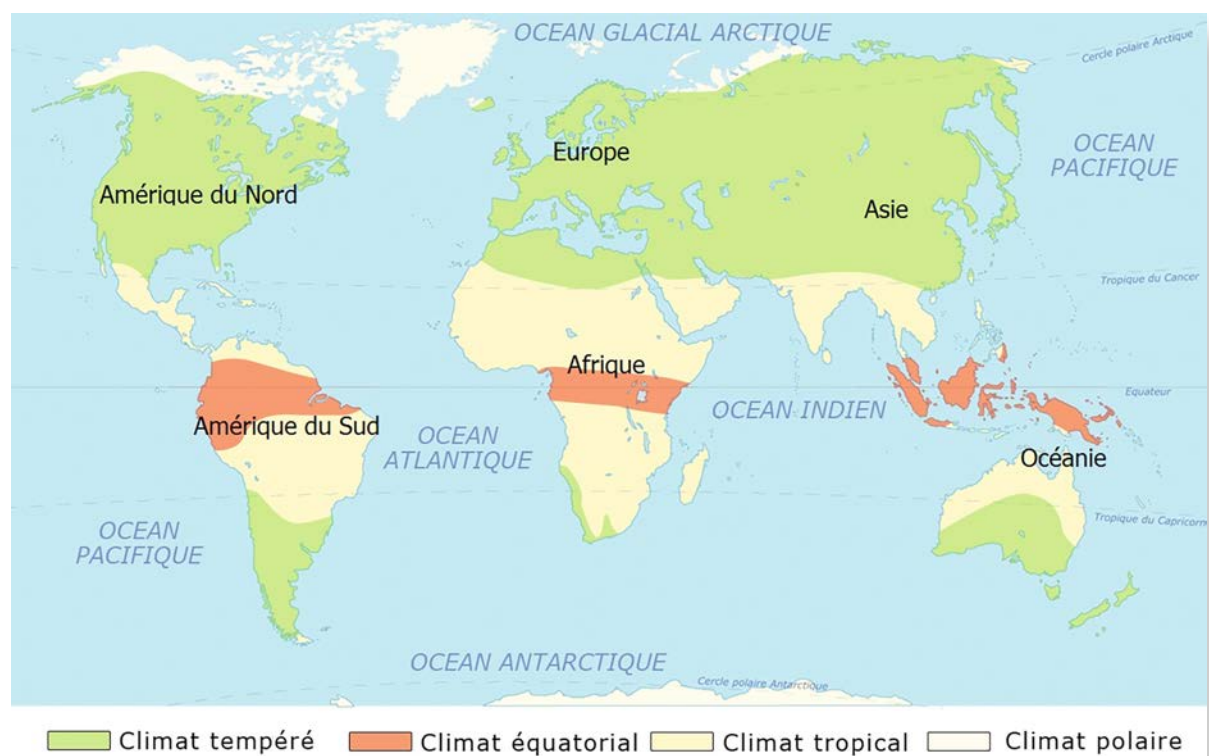


Figure 2 - Carte de répartition des climats sur Terre

Les régions tropicales africaines ont des **températures élevées pendant toute l'année**, et **se différencient par le régime des pluies**: deux saisons des pluies sous l'équateur et une seule saison pluvieuse de plus en plus courte quand on se rapproche des tropiques.

Le régime des pluies est particulièrement influent. Quand les pluies sont violentes (les pluies d'orage sont souvent très violentes) et si le terrain est en pente, l'eau ruissellera le long de cette pente et elle sera perdue pour le champ. Mais l'eau peut aussi détacher et accumuler les particules de la surface du sol (FAO, 1994). La pluie occasionne alors la formation **de croûtes plus ou moins lisses à la surface** (« battance » des sols), entraînant une asphyxie et empêchant les jeunes pousses de sortir. L'eau ne peut s'infiltrer suffisamment vite dans le sol. Elle stagne à la surface, parfois pendant des périodes prolongées, limitant les échanges avec l'air.

Par ailleurs, de faibles précipitations limitent la productivité des sols en Afrique subsaharienne. La sécheresse peut empêcher la manifestation des propriétés intrinsèques du sol: les sols des pays désertiques d'Afrique peuvent être fertiles... mais ne pas être productifs! (Vallerie, 1968).

#### 2.1.2.2. *La profondeur du sol*

La profondeur d'un sol peut se définir comme **l'épaisseur de sol exploitable par les racines** d'une culture à enracinement profond. De façon assez immédiate, plus un sol est « profond », plus il peut mettre d'eau ou d'éléments nutritifs à disposition des racines des cultures, plus il a de potentiel agronomique. La profondeur du sol est la condition du développement du système racinaire (Raoul, 1989).



Figure 3 - Sol profond caractérisé par l'épaisseur exploitable par les racines d'une culture à enracinement profond (Raoul, 1989)  
[Source : <http://agriculture-de-conservation.com>].

Les horizons accessibles aux racines, en particulier dans les sols tropicaux, possèdent fréquemment en profondeur **des horizons impénétrables** (cuirasse: croûte dure et terme général désignant un horizon superficiel ou supérieur d'un profil pédologique que l'on observe sous les climats semi-arides; pans: couches de sols très compactés, indurés ou ayant une forte teneur en argile;...). **Lorsque ces matériaux sont proches à la surface, le volume de terre exploitable par les racines est réduit.** Ce fait lié à une pauvreté générale peut se révéler très néfaste surtout pour les plantes à système racinaire pivotant (Vallerie, 1968). Par exemple dans les Caraïbes, la productivité des terres est limitée par l'insuffisance de fertilité naturelle et de profondeur des sols.

### 2.1.2.3. La texture et la structure du sol

Les sols tropicaux ont souvent une **texture grossière** (ex : sols sableux) leur conférant un caractère filtrant : **leur capacité de rétention des nutriments est donc faible** (FAO, 1980). À cet égard, on distingue (Frisque, 2007) :

- *les sols sableux* qui recouvrent des surfaces immenses dans les zones tropicales sèches et semi-humides. Ces sols fournissent peu d'eau aux plantes: une grande quantité d'eau de pluie est perdue par ruissellement et par infiltration; d'autre part, les faibles teneurs en argile et en limons ne permettent pas de retenir l'eau dans le sol. Les propriétés de ces sols accentuent donc les risques de sécheresse liés au climat tropical. Les sols sableux s'agglomèrent difficilement en motte ce qui les rend légers et faciles d'accès aux racines mais aussi sensibles à l'érosion (Raoul, 1989).
- *les sols limoneux* qui sont « battants » et « asphyxiants »: leurs particules fines laissent peu d'espace, ce qui conduit le sol à se tasser sous l'effet de la pluie et à retenir l'eau qui ne s'infiltré pas en profondeur.
- *les sols argileux* qui sont imperméables: leurs fines particules agissent comme une colle qui empêche l'infiltration de l'eau.

La **structure du sol a aussi un impact direct sur sa fertilité**. Dans un sol bien structuré, les particules de sable et de limon sont liées en agrégats (petites mottes) par l'argile, l'humus et le calcium (Soltner, 1977). Ces agrégats améliorent la résistance du sol à l'érosion, évitent le phénomène de battance<sup>20</sup>, sont favorables à la circulation de l'eau et de l'air et, par conséquent, permettent un bon développement racinaire et une bonne activité biologique du sol.

La **porosité du sol** (c'est-à-dire le volume du sol occupé par l'air et la solution du sol) fournit de l'espace pour la respiration des racines et des microorganismes et pour le stockage d'eau. Un sol bien drainé fournit suffisamment d'humidité pour la croissance des plantes, et une aération suffisante pour un bon fonctionnement des racines. Les grands espaces vides entre **les agrégats** (macropores) permettent à l'eau et à l'air de circuler et aux racines de s'enfoncer dans le sol. Les petits espaces vides (micropores) retiennent quant à eux l'eau dont les plantes ont besoin.

20 La battance est le caractère d'un sol tendant à se désagréger et à former une croûte en surface sous l'action de la pluie (les gouttes de pluie arrachent des particules d'argile en surface). L'argile, la matière organique et les ions calcium augmentent la stabilité structurale du sol, augmentant sa résistance à la battance.



Dans un sol très sec, tous les pores (petits trous et canaux entre les particules du sol) sont remplis d'air, et le fonctionnement du système racinaire ainsi que la croissance de la plante sont compromis en raison de la sécheresse. Dans un sol inondé, les pores sont saturés d'eau de façon que les racines de la plupart des cultures ne puissent pas respirer et peuvent donc mourir. Seul le riz fait exception parce qu'il a des racines qui peuvent respirer dans de l'eau stagnante.

Cette structure «idéale» est appelée «structure grumeleuse» (cf. chapitre 1). L'activité biologique y est favorisée et l'efficacité des engrais minéraux et organiques est accrue. Les racines peuvent explorer un vaste espace et s'offrir ainsi une surface de contact plus grande avec le sol. **La culture a alors accès à une grande réserve minérale et une réserve en eau plus grande pour se nourrir** (Breune *et al.*, 2000).

La structure joue donc un rôle capital dans la fertilité naturelle. Malheureusement il est difficile de la définir d'une façon simple et surtout de la mesurer. De plus la structure du sol est sensible à l'action des agents atmosphériques et en particulier à l'action de l'eau. C'est ainsi qu'apparaît la notion de **stabilité structurale qui définit la résistance des agrégats du sol** à l'action de divers facteurs parmi lesquels l'eau joue directement ou indirectement un rôle essentiel (Vallerie, 1968) (cf. chapitre 1).

### 2.1.3. Importance de la matière organique pour la fertilité nutritionnelle des sols

Pour maintenir la fertilité du sol, il faut commencer par **préserver la matière organique** qu'il contient. Longtemps le rôle de l'humus dans la nutrition des plantes a été minimisé et on a donc ignoré les rôles multifonctionnels critiques que jouent la matière organique et la biologie du sol dans la fourniture aux plantes de bonnes quantités de minéraux. **La présence de matière organique dans le sol (matière fraîche organique et humus) est essentielle pour maintenir sa richesse en éléments nutritifs** pour la plante. C'est l'humus, qui donne une couleur foncée au sol, qui permet de **retenir beaucoup d'eau et de substances nutritives**. On peut y parvenir par des pratiques agricoles appropriées et en utilisant du fumier, du compost ou d'autres matériaux organiques selon les disponibilités.

Si le sol est très détérioré, l'utilisation d'engrais chimiques peut devenir nécessaire. **Les engrais chimiques permettent de restaurer la fertilité du sol très rapidement** (mais aussi provisoirement), car la plante peut les utiliser dès qu'ils sont dissous dans le sol. Par contre, la matière organique demande un certain temps avant de se transformer en humus et de libérer ses matières nutritives.

En dépit de son rôle crucial dans la préservation de la fertilité des sols, la quantité de matière organique (fumier, paille,...) nécessaire n'est simplement pas disponible pour la majorité des petits producteurs. Pour disposer de **fumier** par exemple, il n'y a souvent **pas assez d'animaux pour le produire**, surtout quand la sécheresse cause la diminution du bétail en raison de la pénurie de fourrage. Les paysans ne peuvent augmenter le nombre de leurs têtes de bétail que s'ils ont suffisamment de pâturage ou s'ils sont capables de fournir assez de fourrage, qui à son tour exige une productivité de cultures accrue pour produire des quantités suffisantes de résidus de cultures et de fourrage pour animaux. De même, pour **la préparation du**

**compost** à partir de **la paille** : l'analyse des systèmes d'exploitation révèle qu'il y a concurrence pour la paille. Là où la paille est utilisée comme aliment pour bétail, il n'y en a **plus assez pour la préparation du compost**.

Il est possible de **produire des intrants organiques en plantant des cultures de couverture** (par exemple *Mucuna pruriens* et d'autres plantes) qui servent d'« engrais verts », que ce soit près de la maison du paysan ou loin de la maison, et qui sont utilisées à la fois pour des apports en éléments nutritifs et comme amendements du sol. Même si des résultats prometteurs ont été obtenus dans des essais agronomiques contrôlés par des chercheurs, **les agriculteurs adoptent rarement ces pratiques**, parce qu'elles :

- exigent une haute intensité de main-d'œuvre ;
- ne peuvent pas fournir suffisamment de nutriments pour soutenir la productivité ;
- ne produisent pas des produits qui peuvent être consommés ou vendus au marché.

#### 2.1.4. Importance de la biologie du sol pour sa fertilité<sup>21</sup>

La plupart des systèmes agricoles conventionnels ont ignoré **les rôles multifonctionnels clés de la biologie du sol** et ses relations avec la productivité des terres agricoles. Pourtant, les organismes du sol interviennent aussi bien dans les aspects physiques que chimiques de la qualité des sols.

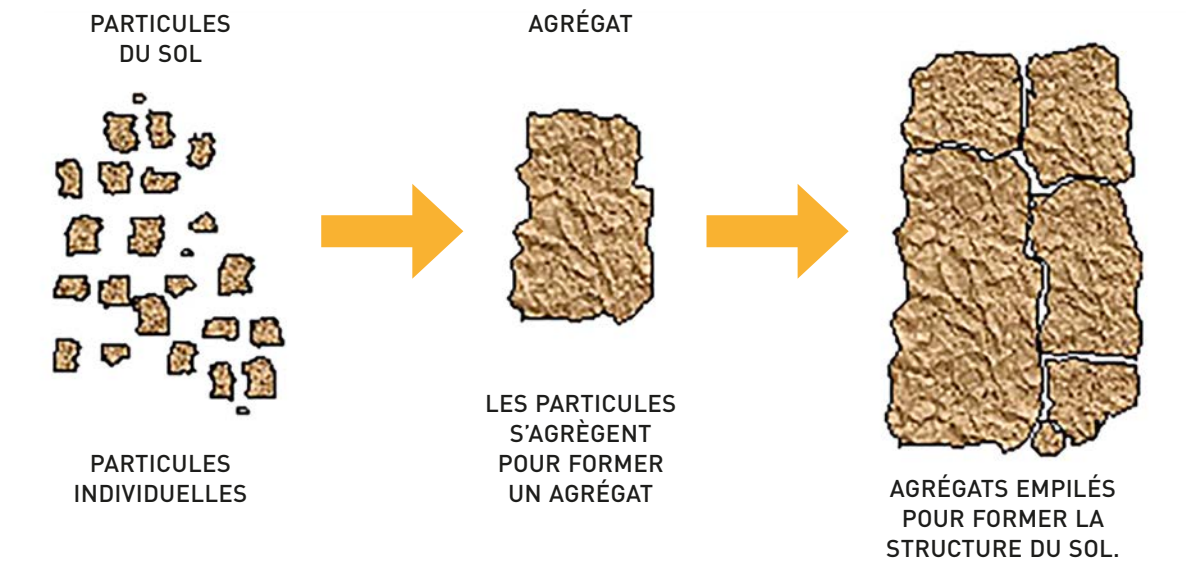
Les **macroorganismes** (vers de terre, termites, scarabées, petits rongeurs, etc.) creusent jusqu'à de grandes profondeurs de larges pores, ou même des galeries, facilitant le drainage, l'aération, etc. et donc participent à l'entretien du sol, à l'enfouissement de la litière, à la décomposition de la croûte, au déplacement des particules du sol et à la formation des pores.

Mais ce sont les **microorganismes** qui conditionnent le plus la fertilité du sol. Ils ont pour rôle de :

- Rendre les nutriments disponibles
  - Décomposition de la matière organique et libération de nutriments ;
  - Solubilisation des minéraux issus des roches ;
  - Chélation<sup>22</sup> et complexation des nutriments.
- Améliorer la structure du sol par la formation d'agrégats obtenus lors de la décomposition par le mélange de l'argile avec d'autres particules en formes ouvertes aléatoires qui sont ensuite collées avec de l'humus, des polymères organiques et les hyphes des champignons.

21 Voir aussi COLEACP, Manuel sur l'agriculture biologique.

22 La chélation est un processus physico-chimique au cours duquel se forme un complexe (le chélate) entre un ligand (le chélateur) et un ion (cation) métallique, qui est ainsi complexé (on dit chélaté) par au moins deux liaisons de coordination (ce qui différencie le « chélate » des « complexes » qui sont comparativement moins stables dans les sols). Les acides organiques présents dans la matière organique en décomposition peuvent former des chélates et lier une variété d'ions métalliques dans le sol comme le fer, le cuivre, le zinc et l'aluminium. En plus des microorganismes, la plupart des plantes sécrètent par leur racine des chélateurs pour faciliter l'absorption de certains éléments du sol.



- Capturer et fixer l'azote: de nombreuses études montrent que ces microorganismes produisent un éventail de composants que les plantes utilisent pour se nourrir. Parmi ces microorganismes, **les plus connus sont les bactéries** du genre *Rhizobium* qui vivent dans les racines des légumineuses. Elles captent l'azote et le convertissent dans des formes que les plantes peuvent utiliser. Depuis, on a mis au point il a mis au point des inoculum microbiens pour former des enrobages qui protègent les jeunes plants.
- D'augmenter l'absorption des éléments nutritifs: les groupes de microorganismes qui sont **bénéfiques pour la fertilité du sol sont les mycorhizes et les champignons** apparentés. Ces champignons vivent dans les racines des plantes (la **rhizosphère**) et étendent leur fils de mycélium dans le sol pour y puiser les minéraux. Ils échangent ces minéraux contre du glucose. Ils jouent un rôle **important dans l'absorption de phosphore chez de nombreuses espèces végétales**, étant donné qu'ils possèdent des enzymes qui peuvent extraire le phosphore des roches et le bloquer dans des molécules comme les phosphures de fer et les phosphates di et tricalciques pour le relâcher dans les racines des plantes.

La **plus forte concentration de microorganismes du sol** se trouve dans une **région étroite au voisinage des racines des plantes**. En 1904, le scientifique allemand Hiltner a proposé le terme et le concept de « rhizosphère ».

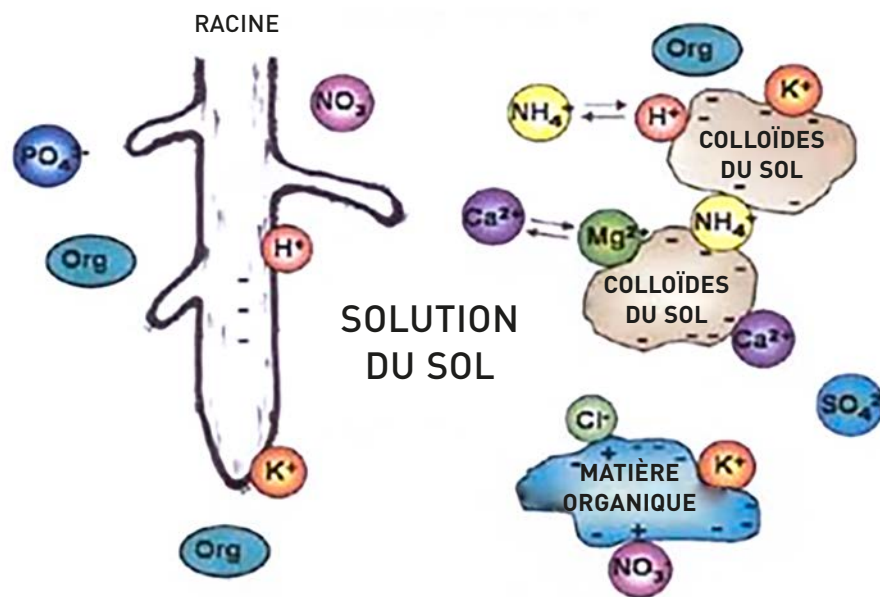


Figure 4 - Représentation schématique du système sol-rhizosphère

Hiltner était convaincu que les exsudats racinaires de différentes plantes favorisaient le développement de différentes communautés bactériennes. Sa définition de la «rhizosphère» en 1904 était centrée sur l'idée que la nutrition des plantes est considérablement influencée par la composition microbienne de la rhizosphère. Hiltner a observé des cellules bactériennes même à l'intérieur du rhizoderme de racines saines. En analogie avec les symbiotes des racines fongiques, Hiltner a nommé la communauté bactérienne étroitement associée aux racines «bacteriorhiza». Dans son concept de rhizosphère, Hiltner a également envisagé que les bactéries bénéfiques ne sont pas seulement attirées par les exsudats radiculaires, mais qu'il y a aussi «des hôtes non invités» qui s'adaptent aux exsudats racinaires spécifiques. Il a postulé que la **santé globale des plantes dépendait de la santé de ces diverses colonies de microorganismes**, dans la mesure où ces derniers les protègent contre les pathogènes et les aident à absorber les minéraux. Il a formulé l'hypothèse que la résistance des plantes face aux pathogènes dépend de la composition de la microflore de la rhizosphère. Il a même émis l'idée que la qualité des produits végétaux pouvait dépendre de la composition de la microflore des racines.

La science relative à la rhizosphère a fait d'énormes progrès, même si la complexité des interactions au sein de la très grande biodiversité autour des racines dans les sols est telle que nous ne la comprenons pas encore totalement et que par conséquent, les résultats n'en sont pas encore largement appliqués dans l'agriculture.

La biologie du sol joue donc de nombreux rôles dans l'optimisation de la production agricole, et toute gestion durable de la fertilité doit éviter de porter atteinte à **la vie et à l'équilibre du sol**, soit par des pratiques agricoles agressives soit par l'épandage de produits chimiques, ou même organiques, toxiques pour ces microorganismes.

## 2.2. COMMENT APPRÉCIER LA FERTILITÉ ?

### 2.2.1. Critères d'appréciation de la fertilité du sol

Le tableau suivant décrit les critères d'appréciation de la fertilité du sol.

Tableau 2 : Critères d'appréciation de la fertilité du sol.

Propriétés du sol	Critères de fertilité
Profondeur	Une grande profondeur offre un grand espace aux racines et une grande réserve de matières nutritives et d'eau du sol. Les racines profondes sont aussi préservées de dessiccation lors de sécheresse (Boeuf, 1999).
Texture et structure	Les grains moyens et une bonne structure sont des critères d'une bonne fertilité car ils favorisent un bon développement du système racinaire, une bonne infiltration et conservation de l'eau et une bonne aération (Morellet, 1998).
Réaction du sol	Le pH voisin de la neutralité (pH 6-7) favorise l'assimilation des éléments nutritifs par les plantes. Par exemple, dans les sols basiques, le phosphore s'associe au calcium alors que dans les sols acides, il s'associe au fer en devenant insoluble. Dans les deux cas il est indisponible pour les végétaux. En revanche à pH neutre il est soluble donc assimilable. L'activité biologique du sol est influencée, dans sa nature et dans son intensité, par le pH (Pousset, 2002).
Composition minéralogique du substrat parental (roche-mère) <i>L'altération de la roche-mère forme les sols et libère les éléments nutritifs. La teneur initiale en minéraux de la roche-mère, la nature et l'intensité du processus d'altération déterminent la nature et la quantité d'éléments nutritifs libérés.</i>	Un substrat parental homogène donne un sol pauvre en éléments nutritifs et fournit une alimentation déséquilibrée. Par contre, un substrat hétérogène (sable-argile-calcaire,...) donne un sol riche en divers éléments nutritifs et fournit une alimentation plus ou moins équilibrée (Wightman, 2006).
Teneur en éléments nutritifs	Une teneur en réserve des éléments nutritifs majeures (NPK) et en éléments traces ou oligoéléments (bore, fer, cuivre, zinc, molybdène, manganèse et chlore) et une teneur optimale de la fraction mobile favorisent une croissance optimale et soutenue des plantes (Naitormbaide, 2007).
Teneur et composition de l'humus	Les colloïdes améliorent la structure du sol, forment des complexes facilement mobilisables avec les substances minérales et activent la vie des microorganismes auxquels ils servent de support et d'aliment (Soltner, 1977).



Teneur en produits toxiques (pour les sols, pour les plantes, mais aussi pour l'homme en cas d'accumulation dans le produit récolté)

*Certaines pratiques agricoles sont à l'origine de l'introduction de métaux lourds dans le sol (apportés par les engrais, les lisiers, les fumiers, les composts et les boues de station d'épuration).*

Présence des éléments trace métalliques (ETM) dans le sol à de (très) faibles concentrations. Quand ils sont prélevés par les plantes, ils peuvent rendre les produits récoltés impropres à la consommation (des concentrations limites existent notamment pour le Pb et le Cd).

Surtout: plomb (Pb), cadmium (Cd), cuivre (Cu) et, plus rarement, zinc (Zn) ou mercure (Hg).

### 2.2.2. Déterminer la fertilité d'un sol

Au chapitre 1, sont présentés des tests simples qui permettent de juger de la texture (ex: test du boudin) et de la structure du sol. Réaliser un «profil de sol» est très intéressant pour évaluer sa profondeur et visualiser la zone d'enracinement.

Plusieurs méthodes permettent de déterminer l'état de fertilité du sol d'une région donnée :

#### Le diagnostic visuel

La **couleur du sol** est une bonne indication de sa teneur en matière organique et de sa nature (classification des sols). La nécessité de codifier cette appréciation visuelle de la couleur en se basant sur des comparaisons avec des étalons colorés s'est rapidement fait sentir dès les débuts de l'étude des sols, car la couleur apparaissait déjà comme une donnée importante (**système, code ou charte Munsell**). Dans les années 1950, les pédologues sont arrivés à réaliser une gamme de «couleurs étalons» adaptées aux couleurs de sols les plus fréquemment rencontrées. La couleur du sol est comparée le plus souvent sur le terrain, à la lumière du jour, avec les couleurs de planches. En déplaçant l'échantillon de sol dans des fenêtres prévues sous chaque échantillon coloré, **on repère celui dont la couleur se rapproche le mieux** et on note ses caractéristiques (**teinte, clarté, pureté**). Pour déterminer la teneur en matière organique, on utilise la charte Munsell. La clarté du sol est corrélée négativement avec le taux de carbone : plus il y a de carbone, plus la couleur est foncée. La précision de cette méthode de détermination des couleurs dépend beaucoup du soin que l'on y apporte. En outre, de nombreux caractères permanents (texture, calcaire, fer, etc.) et conjoncturels (humidité, rugosité) sont en effet susceptibles d'affecter la couleur des sols,

#### Les plantes indicatrices

Les agriculteurs estiment aussi la fertilité en se fondant sur une connaissance longuement acquise de la **valeur indicatrice de la végétation** ou de certains **signes observables à la surface du sol**.

En agriculture on a pendant très longtemps utilisé des **plantes indicatrices** pour connaître ce qu'on appelle le milieu naturel, sa fertilité en général, ses aptitudes culturelles particulières ou plus précisément certaines contraintes ou conditions pédoclimatiques. En effet, si la composition floristique de la végétation spontanée

est le résultat d'une combinaison précise de facteurs écologiques, **la présence d'une espèce a alors une valeur informative** (ex: plantes indicatrices de sols acides, de terrains calcaires ou sablonneux, de sols fertiles, de sols lourds, de sols compactés, de sols salins, etc.).

C'est cette valeur informative de la végétation et de certains signes édaphiques qui permettent aux agriculteurs de décider de mettre ou non une culture dans une parcelle (aujourd'hui des guides sont disponibles en Europe comme le Guide de Gérard Ducerf, PromoNature, en trois volumes<sup>23</sup>). Selon M'Biandoum *et al.* (2002), il apparaît que le niveau de fertilité d'un sol peut s'évaluer par l'identification de deux groupes d'adventices: les «herbes guides», non discriminantes mais dont l'importance oriente le diagnostic, et les «herbes bioindicatrices» dont la présence ou l'absence est discriminante. La présence ou l'absence de ces espèces, permet au paysan de déterminer si les parcelles sont fertiles ou à l'inverse dégradées. À partir de là, il décide d'exploiter ou non le champ. Les espèces végétales qui poussent sur les parcelles servent à prendre plusieurs décisions: (1) celle de décider de mettre en culture une parcelle; (2) celle de décider des modalités de cette mise en culture; (3) celle de décider d'abandonner ce champ pour le mettre en jachère.

On peut regrouper dans un tableau quelques exemples de plantes bioindicatrices (au Cameroun) (adapté de M'Biandoum *et al.* 2002):

Plantes indicatrices de sols dégradés	Plantes indicatrices de sols fertiles
<i>Ageratum lonyzoïdes</i>	<i>Andropogon gayanus</i>
<i>Amaranthus graecizans</i>	<i>Andropogon tectorum</i>
<i>Amaranthus spinosus</i>	<i>Cassia mimosoïdes</i>
<i>Brachiaria lata</i>	<i>Celosia argentea</i>
<i>Bulbostylis barbata</i>	<i>Chloris pilosa</i>
<i>Celosia argentea</i>	<i>Crotalaria retusa</i>
<i>Chrysanthellum americanus</i>	<i>Digitaria argillacea</i>
<i>Commelina benghalensis</i>	<i>Hyptis suaveolens</i>
<i>Commelina forskalaei</i>	<i>Indigofera hirsuta</i>
<i>Cucumis melo</i>	<i>Ipomoea dichroa</i>
<i>Cyperus amabilis</i>	<i>Kyllinga tenuifolia</i>
<i>Eleusine indica</i>	<i>Pennisetum pedicellatum</i>
<i>Indigofera dendroïdes</i>	<i>Phyllanthus amarus</i>
<i>Indigofera hirsuta</i>	<i>Physalis micrantha</i>
<i>Portulaca oleracen</i>	<i>Rottboellia cochinchinensis</i>
<i>Striga hermonthica</i>	<i>Triumfetta pentandra</i>
<i>Tephrosia bracteolata</i>	
<i>Tribulus terrestris</i>	
<i>Waltheria indica</i>	

23 PromoNature : Société d'étude et d'expertise floristique – Photothèque nature et environnement – Formation. <http://www.gibbeuse.org/2013/05/05/guide-plantes-bio-indicatrices/>

Cependant, selon ces auteurs il faut être prudent dans l'interprétation. **La richesse floristique d'un terroir dépend du climat de la région, du type et de la richesse des sols.** Au Cameroun, dans deux contextes différents, la même plante n'aura donc pas forcément la même signification. Ainsi, par exemple, alors qu'à Mafa Kilda *Commelina bengalensis* est considérée par les paysans comme un indicateur de sol fertile. Par contre à Fignolé cette espèce est considérée comme un indicateur de sol dégradé. En fait, à Fignolé, le climat est plus pluvieux qu'à Mafa Kilda, la biodiversité y est plus importante, les sols sont encore très riches et surtout l'espace est disponible, ce qui permet de longues jachères et un choix très exigeant des meilleures parcelles. À Mafa Kilda, l'espace est saturé, et les paysans ne peuvent pas être aussi exigeants. Ainsi, un sol qui est considéré comme fertile à Mafa Kilda serait mis en jachère à Fignolé, car il est déjà relativement pauvre, et les paysans préfèrent alors lancer une nouvelle défriche, puisque l'espace disponible le permet.

La richesse du sol permet **l'installation d'une flore bien spécifique.** Ainsi, si le phosphore du sol est bloqué, certaines adventices voient leur dormance levée et germent (ce sont parfois des graines âgées d'une centaine d'années qui peuvent ainsi germer). Certains agriculteurs font le lien entre la présence d'*Imperata cylindrica* et la faible richesse en phosphore disponible dans le sol. Dans d'autres circonstances, ce sont l'engorgement du sol en matière organique animale (trop de N et de K), signe d'un début anaérobiose qui entraîne le développement de certaines plantes. D'autres phénomènes (compactage du sol, engorgement en eau, labours trop profonds, surpâturage, les feux de végétation et la déforestation) engendrent des effets comparables et le développement d'une flore particulière qui signale à l'observateur attentif la dégradation de certains paramètres.

Par exemple, le *Cyperus amabilis* est une **espèce végétale caractéristique** des sols à horizon superficiel sableux temporairement humides, comme les sols ferrugineux dégradés.



Figure 5 - Plantule de *Cyperus amabilis*

Au Ghana les agriculteurs, quand ils choisissent l'emplacement où planter des cacaoyers, préfèrent les sols de plateau brun rougeâtre aux sols gris sableux, et recherchent la présence de certains arbres sur le site éventuel. La présence de *Cylicodiscus gabunensis* et *Ricinodendron hendolotii* est perçue comme indicatrice de sols favorables au cacaoyer, alors que les sols médiocres pour ces arbustes sont associés à *Mallotus oppositifolius* et *Aracia pennata* (FAO, 1994). Chez les Peuls, des plantes comme le *Cyperus pustulatus* ou comme *Crotalaria retusa* ont la réputation d'être indicatrices d'une bonne fertilité des sols (ils disent que « ces plantes aident à pousser »).

Les plantes peuvent servir d'indicateurs pour d'autres facteurs que la fertilité, comme :

- savoir quel est le climat de la région ;
- avoir une idée des conditions permanentes ou constantes ;
- avoir une idée de l'évolution de la fertilité des sols ;
- connaître les amplitudes de variation ou battement (nappes phréatiques), les alternances journalières (jours chauds / nuits froides) ou saisonnières ;
- indiquer des événements réguliers (fauche, feu, pâturage,...).

### Les analyses du sol

Des analyses en laboratoire **complètent utilement l'observation de terrain** pour établir le diagnostic. Analyser le sol est une meilleure méthode que l'observation des symptômes de carence et que l'analyse de la plante, car il permet de déterminer le besoin de la plante en éléments nutritifs avant la plantation. C'est à travers l'analyse du sol que les qualités et les défauts du sol peuvent être connus en vue de l'amélioration du rendement tant en qualité qu'en quantité.

L'analyse du sol détermine sa nature, sa composition et ses ressources :

- elle précise les différentes caractéristiques du sol : sa composition (y compris sa teneur en matière organique), sa structure, son pH...
- elle identifie les carences ou les excès pour pouvoir y apporter une réponse spécifique.

Les résultats varient selon le laboratoire qui réalise l'analyse (et aussi la façon dont on a réalisé le prélèvement des échantillons !). En général, un bulletin indique au moins :

- le type de sol ;
- le taux d'acidité ( $\text{pH}_{\text{eau}}$  : un critère utile notamment pour envisager un chaulage en zones acides ( $\text{pH}_{\text{eau}}$  inférieur à 6)<sup>24</sup> ;
- le taux de carbone organique (%MO) et rapport C/N ;

24 En sols non calcaires, on peut aussi mesurer le pH KCl, un pH « théorique » qui permet de connaître l'acidité potentielle du sol. Il correspond au pH « plancher » vers lequel tendent tous les sols à cause du processus d'acidification. Le pH KCl est toujours inférieur au pH eau, l'écart entre les deux varie de 0,2 à 1,5. Quand l'écart est > 1, l'acidité de réserve est élevée. Quand il est < 0,5, cette réserve est faible.

- les teneurs en azote (N), phosphore ( $P_2O_5$ ), potassium ( $K_2O$ ), mais aussi calcium (Ca), magnésium (MgO) et sodium (Na) échangeables ;
- le calcaire total et le calcaire actif.

Certains laboratoires indiquent aussi les besoins en chaux ou donnent d'autres conseils sur la fumure, l'apport de matière organique, sur le pourcentage de sable à ajouter au sol pour l'amender, etc.

Il est toujours possible de demander des analyses complémentaires sur :

- la granulométrie (taille des particules selon 5 fractions) : Argile (0,002 mm) – Limons fins (0,02 mm) – Limons grossiers (0,05 mm) – Sables fins (0,2 mm) – Sables grossiers (2 mm) – Refus (éléments grossiers, cailloux) (cf. Chapitre 1) ;
- la capacité d'échange cationique (CEC) ; pour rappel, la CEC est utilisée comme mesure de la fertilité d'un sol en indiquant la capacité de rétention des éléments nutritifs d'un sol donné (cf. Chapitre 1) ;
- le cuivre (Cu) ;
- le fer (Fe) ;
- le soufre (S) ;
- le zinc (Zn) ;
- le chlore (Cl) ;
- le manganèse (Mn) ;
- les oligo-éléments ;
- le compost et autres amendements organiques ;
- la texture du sol (pourcentages de sable, de limon, d'argile) ;
- l'humus présent et souhaitable ;
- les éléments métalliques : nickel, chrome, etc., mais surtout les éléments potentiellement toxiques comme le plomb (Pb) ou le cadmium (Cd).



## Diagnostic de la structure et de l'activité biologique du sol

Quelques tests simples permettent un premier diagnostic de la structure du sol.



Figure 6 – Observation d'un profil directement dans la parcelle  
(Source : Lhote, Rencontre technique Ctifl / Itab).

**Réaliser un profil de sol** ne donne pas toutes les clés pour comprendre le fonctionnement du sol, mais l'observation physique du profil cultural est une étape essentielle (observer le profil, déterminer la roche mère, l'origine du sol, intégrer le climat pour estimer le comportement de la matière organique, etc.).

**Réaliser le test de la « bêche »** : prélever un volume de sol et l'étaler sur une bâche étendue au sol ; observer la terre fine, les mottes, les cailloux sur la bêche et sur la bâche.

**Compter les macropores** : on peut évaluer l'effet de l'activité des macroorganismes du sol sur la structure par le dénombrement des macropores : à partir d'un profil ou d'une mini-fosse, compter les macropores ( $\emptyset > 3$  mm) à mi-profondeur ou en profondeur. La densité des galeries de vers est un bon indicateur de la quantité de vers de terre présents (biomasse lombricienne) et donc du fonctionnement biologique du sol. La densité des grosses galeries ( $\emptyset > 3$  mm) indique l'activité ; la densité des petites galeries ( $\emptyset$  entre 0,5 et 1 mm) indique la porosité du sol.

Densité	Activité des vers de terre	Signification
Une grosse galerie tous les 3 à 5 cm	Excellente	Eviter de perturber le milieu
Une grosse galerie tous les 5 à 10 cm	Très bonne activité	Continuer à favoriser cette bonne activité
Une grosse galerie tous les 20 à 40 cm	Moyenne	Activité lombricienne à améliorer
Une grosse galerie tous les 50 à 100 cm	Faible	Favoriser le développement des vers de terre
Pas de grosses galeries	Très faible	Absence de gros vers de terre. Créer dans le sol des conditions écologiques favorables à leur installation et développement

La densité des **petites galeries** est un bon indicateur de la porosité qui est un des facteurs important de la qualité structurale du sol.

Nombre de petites galeries sur 4 cm <sup>2</sup>	Nombre de petites galeries sur 100 cm <sup>2</sup>	Mesure de la porosité (par les galeries)
> 40	> 1000	Excellente
20 à 40	500 à 1000	Très forte
10 à 20	250 à 500	Forte
3 à 10	75 à 250	Moyenne
1 – 3	25 à 75	Faible
< 1	< 25	Très faible

**Dénombrer et identifier les vers de terre** : cette méthode est basée sur le prélèvement de sol, le dénombrement et l'identification simplifiée des vers (bio-indicateurs de la vie du sol).

**Evaluer la porosité du sol en mesurant le temps d'infiltration de l'eau dans le sol** : infiltrométrie Beerkan simplifiée.

La porosité du sol est définie comme le rapport entre le volume total occupé par les pores (« les vides ») et le volume total (« les vides » + « les pleins ») d'un échantillon (cf. chapitre 1). La porosité étant complexe à mesurer, elle est fréquemment évaluée via une de ses fonctions, la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol.



Figure 7 - Enfoncer un cylindre après avoir dégagé la surface. Verser une quantité d'eau et chronométrer le temps d'infiltration dans le sol (Source : Lhote, Rencontre technique Ctifl / Itab).

La méthode est facile à mettre en oeuvre car le matériel nécessaire est commun et peu coûteux. Par ailleurs, la durée de réalisation de ce test est limitée en comparaison des méthodes classiques. L'intérêt principal du test est avant tout de permettre une comparaison de la porosité du sol dans l'espace ou dans le temps : comparaison de différentes zones au sein d'une parcelle, évolution d'une zone donnée dans le temps.

## PRINCIPE DU TEST D'INFILTROMÉTRIE BEERKAN

*(d'après la fiche de l'ITAB, Institut Technique de l'Agriculture Biologique)*

Le test d'infiltrométrie Beerkan simplifié consiste à mesurer la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, en condition de sol humide et ressuyé. Un volume déterminé d'eau est versé dans un cylindre enfoncé à la surface du sol. Le temps nécessaire à l'infiltration complète du volume d'eau versé est noté. L'opération est répétée jusqu'à ce que le temps d'infiltration se stabilise.

### Comment le réaliser en pratique ?

**Matériel :** bouteilles, cylindre PVC de 30 cm de diamètre et 15 cm de haut, masse et cale, bêche, couteau et soufflet si la surface n'est pas plane, ciseaux, voile plastique de 30 cm de diamètre, tige métallique pour les sols avec des galeries de rongeurs, chronomètre, feuille et stylo.

**Temps :** de 30 minutes à 1 heure pour réaliser un test (10 à 15 volumes d'eau, et donc mesures sur un même endroit, sont nécessaires).

**Répétitions :** le test devrait être répété à 5 ou 6 endroits sur la zone d'intérêt.

**Conditions :** le test peut être réalisé tout au long de l'année. La porosité du sol évolue en fonction de facteurs dont certains peuvent être maîtrisés (date de travail du sol) ou non (activité périodique des vers de terre, croissance du couvert végétal). La période de réalisation du test dépend des objectifs visés. Si la porosité est susceptible d'évoluer fortement dans le temps, plusieurs tests sont à pratiquer durant la période choisie. Le test doit être réalisé **sur un sol humide et ressuyé, dans une zone plane** (éviter les fentes de retrait ou galeries d'animaux et les zones de cailloux). L'emplacement du test dépend également de l'objectif visé. Par exemple, il est possible de comparer une zone tassée (piétinement du bétail ou passage de tracteur) avec une zone sans passage a priori moins compactée ; ou bien de comparer une zone sur le rang et entre le rang en verger.

Pour en savoir plus, consulter la fiche téléchargeable sur :  
<http://www.itab.asso.fr/programmes/solab.php>





**Evaluer l'état de la surface du sol:** structure grumeleuse, turricules (terre rejetée par les vers de terre), fissuration du sol, pores et galeries suite, principalement, à l'activité des vers anéciques (les plus gros vers, ceux qui creusent des galeries verticales profondes).



Figure 8 – Représentation d'un état de structure grumeleuse, avec de nombreux turricules indiquant une activité intense des vers de terre (Source : Delaunois, 2008).

**Regarder attentivement la forme et la densité des racines:** racines fourchues, racines coudées, racines en massue, etc. Quand les racines rencontrent par exemple une semelle de labour (zone compactée difficile à traverser). Cela indique la profondeur et la structure du sol.

Nombre de racines sur 4 cm <sup>2</sup>	Nombre de racines sur 100 cm <sup>2</sup>	Signification de la densité des racines
> 20	> 500	<b>Excellente</b>
10 à 20	205 à 500	<b>Très bonne</b> utilisation des éléments fertilisants du sol N, P, K, Ca, Mg, oligoéléments, ....
5 à 10	125 à 250	<b>Bonne</b>
5	125	<b>Moyenne.</b> Minimum pour une bonne valorisation de l'azote du sol
2 à 5	50 à 125	<b>Faible</b>
1	25	<b>Très faible.</b> Azote du sol très mal valorisé

**Analyser la biomasse microbienne** : la méthode consiste à traiter le sol avec des vapeurs de chloroforme qui tuent la quasi-totalité des microorganismes du sol. Leur contenu cellulaire se répand dans le sol et **le carbone organique correspondant peut alors en être extrait et mesuré**. Cette mesure, est techniquement simple à mettre en œuvre pour sa phase de fumigation et d'extraction et nécessite un appareillage spécifique pour le dosage du carbone soluble des extraits. Les résultats sont précis, fiables et répétables. Les analyses de la biomasse permettent théoriquement :

- la mesure directe de la quantité de vie du sol ;
- d'apprécier les potentialités de minéralisation ;
- d'apprécier la réserve en éléments fertilisants stockés dans la biomasse microbienne ;
- de mesurer l'impact des pratiques culturales (exemple de différenciation de travail du sol).

Cette analyse peut être complétée par l'indice d'activité microbienne (IAM). Mais, ces indices sont fort liés aux conditions de milieu (saison, climat, interventions sur la parcelle).

## 2.3. LA FERTILISATION DES SOLS ET LES ÉLÉMENTS FERTILISANTS

### 2.3.1. Importance et objectifs de la fertilisation

#### 2.3.1.1. Qu'est-ce la fertilisation ?

La fertilisation est le processus consistant à **apporter à un milieu de culture**, tel que le **sol** (mais aussi tout autre substrat artificiel utilisé en horticulture), **les éléments minéraux** nécessaires au développement de la **plante**. **Les engrais** ou « matières fertilisantes » peuvent être de deux types : **chimiques ou organiques**<sup>25</sup>. Ils sont présentés sous forme solide ou sous forme liquide.

Un « engrais » est une substance fertilisante destinée à fournir aux plantes, le plus souvent **par l'intermédiaire du sol**, un ou plusieurs éléments minéraux jugés insuffisamment abondants dans le sol pour nourrir les cultures (Soltner, 1977). Les objectifs de la fertilisation sont **d'obtenir le meilleur rendement possible** (éviter un facteur limitant) compte tenu des autres facteurs qui y concourent (qualité du sol, climat, apports en eau, potentiel génétique des cultures, moyens d'exploitation), ainsi que **la meilleure qualité**, et ce, **au moindre « coût »** (le moins d'impact économique, mais aussi pour la santé et pour l'environnement).

La fertilisation reste toujours difficilement maîtrisée par les producteurs malgré les efforts déployés dans la vulgarisation. **Leurs pratiques habituelles de fertilisation ne sont pas adaptées à une production durable**. Elles sont souvent dépendantes de nombreux facteurs tels que la disponibilité de ressources organiques (effluents d'élevage, etc.), la disponibilité sur le marché des engrais minéraux et surtout leur pouvoir d'achat.

25 On distinguera les engrais, présentés ici, des amendements minéraux ou organiques, qui seront détaillés plus loin.



### 2.3.1.2. Rôle de la fertilisation

Le directeur de la FAO déclarait en 1978 : « *Il existe peu de terres vierges à conquérir. La croissance de la production ne peut venir que d'une amélioration des rendements par l'utilisation des éléments fertilisants* ». Les matières fertilisantes, tant chimiques qu'organiques jouent un rôle important en agriculture :

- elles augmentent le rendement (quantitatif et qualitatif), permettant aux agriculteurs de réaliser plus de bénéfices par rapport au travail fourni et aux produits utilisés ;
- elles permettent d'obtenir de bons rendements avec cultures de valeur qui, sans eux, seraient sans intérêt ou même impossibles. Cet élargissement du choix des espèces cultivées permet à l'agriculteur d'adopter un système de culture plus productif et plus avantageux. Dans ces conditions il existe la possibilité de diversifier la production ;
- l'emploi des engrais du commerce permet d'introduire des éléments nutritifs supplémentaires dans le cycle de la croissance des plantes et dans la composition de leurs débris et ainsi d'améliorer la fertilité.
- le fumier de ferme et les engrais verts peuvent accroître directement la teneur du sol en matière organique tandis que les engrais chimiques le font indirectement en augmentant la quantité de résidus de récoltes qui pourront être incorporés au sol par les labours.
- la fertilisation joue également un rôle sur la qualité des produits. Par exemple, la fertilisation potassique améliore la tenue à la cuisson de la pomme de terre mais peut diminuer la farineuse de la chair (Nicolardot, 2014).

### 2.3.1.3. La fertilisation devrait toujours être raisonnée

La **fertilisation doit répondre aux objectifs de durabilité**. Elle doit être raisonnée et notamment intégrer le **contexte économique** (coût de la fertilisation ; type de marché visé et exigences légales ; valeur intrinsèque du produit récolté et des coproduits) et **environnemental** (impact des fertilisants sur l'environnement : air, sol et eau). L'agriculteur devra définir précisément **ses besoins** en fonction de ses objectifs de production et de son mode de production. Il devra prendre en compte **la nature du sol et les exigences de chaque culture**, dans le cadre de la rotation ou des associations culturales, ainsi que les ressources minérales ou organiques disponibles localement, en quantité et qualité suffisantes et adéquates (effluents d'élevage, compost,...).

A partir d'objectifs de production quantitatifs et qualitatifs l'agriculteur ajuste ses apports de fertilisants qui prennent en compte les caractéristiques du milieu dans lequel il travaille (sol, climat, proximité d'eau de surface ou de zones de captage). C'est une fertilisation qui cherche ainsi à intégrer les contraintes environnementales notamment la **préservation et la restauration de la qualité des eaux et des sols**. Le but est d'apporter à chaque culture une fertilisation suffisante pour sa nutrition, en adaptant la période d'épandage à ses besoins **en évitant tout excès** : « *La Bonne dose au bon moment* ». Par exemple pour les nitrates, cela consiste à déterminer avec soin la quantité et les modalités de leur épandage sur une parcelle en prévision

des besoins de culture et afin de limiter les risques de pollution des eaux par migration des excédents. Les nitrates sont en effet peu retenus par le sol, il faut donc les apporter quand la plante est prête à les absorber afin d'éviter **la lixiviation vers les nappes phréatiques**.

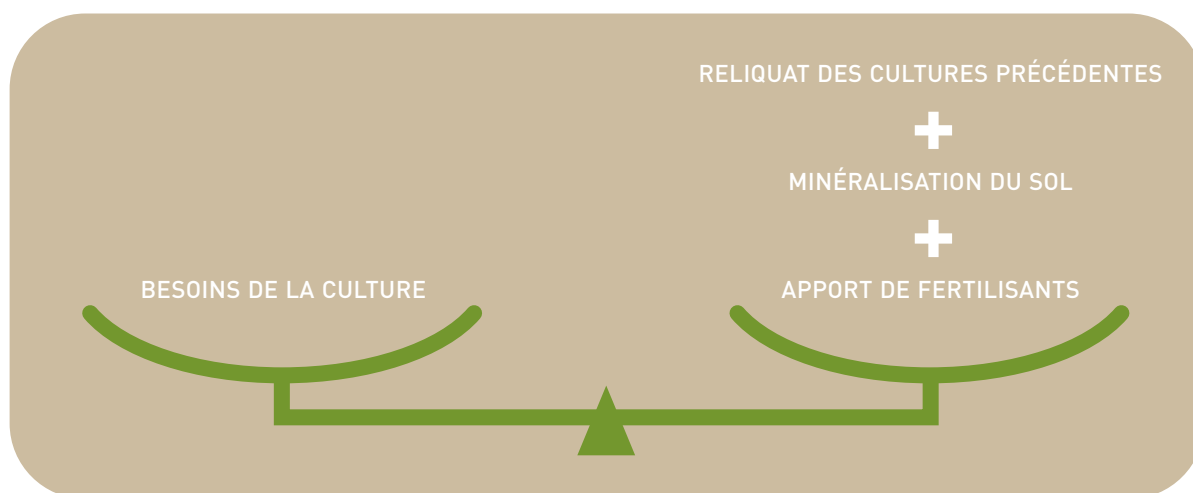


Figure 9 – Raisonner les apports en fonction des besoins

Les types et les quantités d'engrais à utiliser pour accroître les rendements des cultures et pour mieux lutter contre l'érosion varient considérablement suivant les sols et les cultures. La fertilisation raisonnée passe donc par une expertise de la nutrition des plantes. Le choix des engrais appropriés et du taux optimal de fumure nécessite un soin considérable. Il faut **exploiter les analyses de sol**, les résultats des expériences de fumure, les observations sur la vigueur des cultures, et rechercher en outre les symptômes de déficience des éléments fertilisants.

A l'échelle de la parcelle, la détermination d'un objectif de **rendement réaliste**, que ce soit d'un point de vue quantitatif ou qualitatif, permet d'évaluer les besoins en nutriments pour une culture donnée et de **comparer les besoins à l'offre du sol** (c'est le « bilan nutritif »). Le fait que **ces besoins sont rarement totalement satisfaits** par l'offre du sol (en tout cas sur le long terme), implique **la nécessité d'apports complémentaires** d'éléments fertilisants externes à la parcelle, voire même à l'exploitation. Le rôle de la fertilisation est donc d'assurer une efficacité agronomique des apports de fertilisants minéraux et organiques mais aussi d'apporter la garantie de protection, voire l'amélioration, de la qualité des sols.

### 2.3.2. Le bilan nutritif et la gestion des éléments nutritifs

#### 2.3.2.1. Le bilan d'import-export des éléments nutritifs

Selon Randrianarison (2016), en agriculture, un bilan nutritif est **la différence qui existe entre la quantité d'éléments nutritifs apportés par la matière organique et les engrais et la quantité d'éléments nutritifs exportés par la culture ou perdus**, par exemple par érosion ou drainage. En effet, pour éviter l'appauvrissement des sols, il est nécessaire de compenser les prélèvements faits par la culture et les pertes. De plus, afin de garantir à la fois une disponibilité suffisante pour la plante,

et ne pas apporter plus que nécessaire (qui engendrerait une perte financière et des risques écologiques), il est utile de connaître exactement le montant exporté (c'est-à-dire utilisé) par la plante: c'est le «**bilan d'exportation**». **Le montant exporté par la culture indique la quantité de fertilisants** qu'il faut apporter pour la culture suivante (FAO, 2005). Un calcul très précis du bilan est difficile à établir mais **un calcul approximatif peut suffire** pour indiquer si la quantité d'engrais appliquée est trop faible ou trop élevée.

En pratique, un bilan global consiste à estimer, le plus précisément possible, le montant nécessaire pour assurer le niveau de récolte souhaité et le montant théoriquement disponible dans le sol. La balance de ces deux valeurs indique le niveau de fertilisation à apporter. En résumé, l'agriculteur cherche à apporter ni trop, ni pas assez.

### *2.3.2.2. Les exportations minérales*

La récolte **n'exporte qu'une partie des éléments minéraux** mobilisés par la culture. D'après Bertrand et Gigou (2000), ce qui reste au champ, peut être conservé dans les parties pérennes des plantes (bois, racines, etc.) ou retournés au sol par l'excrétion radiculaire, par la chute des feuilles et par les tiges laissées sur le champ. **Les exportations dépendent donc du rendement et des parties exportées.** Une partie des éléments récoltés peut être recyclée, par les fumiers, les composts, les cendres et autres résidus.

Le principe de l'estimation des exportations est simple: peser les récoltes et les résidus sortis du champ, estimer la teneur en matière sèche et analyser leur contenu en élément minéraux, ce qui permet de calculer les quantités d'éléments exportés par les récoltes, par les sous-produits et par les résidus, que l'on peut exprimer en kg/ha d'élément ou en unité fertilisante par ha (Randrianarison, 2016).

### *2.3.2.3. Carence et excès*

Lorsqu'un ou plusieurs éléments nutritifs fait défaut ou est présent en quantité trop faible dans le sol, les **besoins de la plante ne seront pas satisfaits**, sa croissance et son développement seront limités, et **on parle de carence**. Les symptômes de carence se manifesteront de manière spécifique pour chaque plante et selon l'élément qui est déficitaire.



Figure 10 - Symptômes d'une carence en magnésium dans le radis

Par contre, l'apport aux plantes d'éléments fertilisants **en quantité excessive par rapport à leurs besoins peut être nuisible** et affecter sa croissance et son développement normaux. Ceci arrive surtout en pratique avec les oligo-éléments, pour lesquels les besoins des plantes sont très réduits. La toxicité des oligo-éléments se traduit par des effets spécifiques à chacun d'eux et peut varier d'une culture à l'autre, tout comme le seuil de toxicité. Par exemple, l'excès de molybdène cause le jaunissement des pousses chez la tomate (Randrianarison, 2016).

Outre les influences sur la plante elle-même, une fertilisation excessive, notamment en azote minéral soluble, peut entraîner **une pollution des eaux de surface, voire des nappes phréatiques** (nitrates en concentrations excessives dans les eaux potables, très néfastes à la santé). En surface, azote (nitrates, nitrites) et phosphore (phosphates) qui proviennent de l'agriculture, des effluents d'élevage, des eaux usées urbaines et des rejets de certaines industries, peuvent provoquer une prolifération d'algues dans les mares et les cours d'eau qui, à terme, conduit à l'asphyxie (manque d'oxygène) de la faune et flore qui y vivent, entraînant la « mort » du cours d'eau. Les excès d'azote<sup>26</sup> peuvent également rendre l'eau des nappes phréatiques ou des mares impropres à la consommation des hommes ou du bétail.

26 Qui se traduit en teneurs de nitrates (>50 mg/litre), de nitrites (0,1 mg/litre) ou d'ammonium (0,5 mg/litre). À noter que les teneurs d'autres éléments sont aussi réglementés quand il s'agit d'eau dite « potable » (ex : teneur en phosphore  $P_2O_5$  < 5 mg/litre, mais aussi cuivre, zinc, manganèse, fluor, etc.).

#### 2.3.2.4. Les lois d'action des éléments fertilisants<sup>27</sup>

Pour respecter les principes d'une gestion raisonnée, et durable donc, des fertilisants, il faut respecter **les principes de la fertilisation qui reposent sur trois lois fondamentales**. Elles décrivent notamment les effets de l'apport d'éléments fertilisants aux cultures (Nicolardot, 2014). L'application de ces lois générales et les acquis importants plus récents de la recherche agronomique ont débouché sur l'amélioration des connaissances des cycles biogéochimiques des éléments et sur la mise au point de méthode opérationnelles de prévisions des fumures. Ces **prévisions de fertilisation** sont de plus en plus largement appliquées. Le **calcul prévisionnel des doses d'azote** est un outil indispensable à la bonne gestion de la fertilisation pour concilier au mieux productivité et respect du milieu naturel.

##### 1. Loi de restitution ou des avances

Cette loi fondamentale intéresse, **dans le cadre de la rotation des cultures**, l'aspect statique du maintien de la fertilité. Les exportations d'éléments minéraux par les cultures et les pertes hors de la parcelle doivent être compensées par des restitutions pour maintenir la fertilité chimique du sol. Par sécurité, en pratique, à la notion de « restitution », il est préférable de substituer celle d'« avance », en recherchant une alimentation optimale des cultures. Les sols pauvres doivent recevoir une fumure renforcée pour les cultures les plus exigeantes. À l'inverse dans des sols riches, et pour des cultures peu exigeantes, des impasses de fumures P-K peuvent être gérées.

Cette **règle est insuffisante** car de nombreux sols souffrent d'**une pauvreté naturelle en un ou plusieurs éléments** nutritifs, et nécessitent l'apport d'une fumure dite « renforcée », préliminaire indispensable à toute mise en valeur intensive. Il en existe d'autres qui exigent d'être suffisamment enrichis en matière organique ou en calcium pour pouvoir répondre à la définition de sol cultivé.

Par ailleurs, le sol est exposé à des **pertes d'éléments fertilisants** par entraînement dans les eaux de drainage et vers la nappe souterraine, par les eaux de ruissellement et par l'érosion. Ces pertes sont très faibles pour  $P_2O_5$  (moins de 1 kg par ha et par an), faible pour  $K_2O$ . Mais pour N,  $SO_3$  et  $MgO$ , elles peuvent atteindre quelques dizaines de kilos par hectare et par an et même plusieurs centaines pour  $CaO$ ! Pour ces raisons, la détermination de la fumure basée uniquement sur la règle des exportations ne saurait convenir. Elle permet toutefois **une approche globale** qui doit être corrigée en tenant compte de la richesse du sol, des pertes diverses et des besoins « de pointe » au cours du cycle végétatif (exigence des cultures).

##### 2. Loi des accroissements moins que proportionnels (Mitscherlich, 1794-1863)

« Quand on apporte au sol des doses croissantes d'un élément fertilisant, les augmentations de rendement obtenues sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les quantités apportées s'élèvent ». Cette loi se traduit par une courbe dont le sommet représente le rendement maximum possible. Mais, auparavant, on atteint un niveau de rendement où le supplément de récolte obtenu couvre juste la dépense supplémentaire en engrais : le rendement optimum est atteint (voir figure).

27 Voir aussi COLEACP, Manuel « Produire de façon durable et responsable », chapitre 2.



Au-delà de la dose d'engrais C, la **valeur** du supplément de récolte obtenu ne paie pas la valeur du supplément d'engrais utilisé (la valeur de «dc» -supplément de récolte- est inférieure à la valeur de la quantité d'engrais supplémentaire «C-D»).

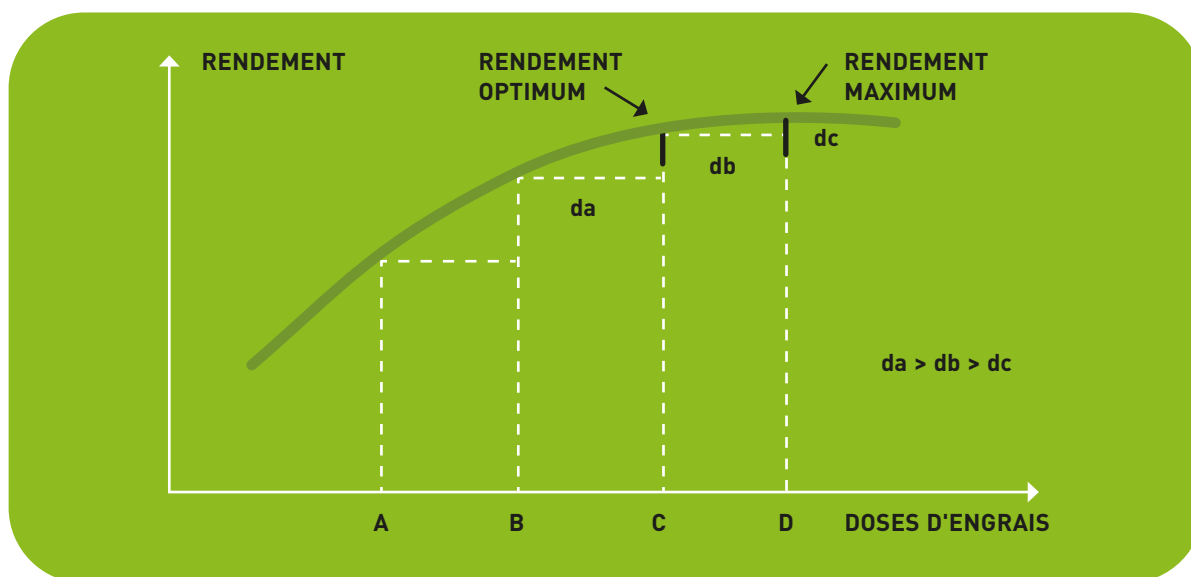


Figure 11 – Représentation schématique de la loi des accroissements moins que proportionnels

Le **mode d'apport des éléments fertilisants** peut modifier l'allure de la courbe. Ainsi, dans la plupart des cas, l'apport d'azote en deux fois donne de meilleurs résultats que l'apport en une seule fois, à égalité de doses d'emploi, tout en permettant une meilleure protection de l'environnement (moins de lessivage).

### 3. Loi du minimum ou d'interaction (Liebig, 1803-1873)



«L'importance du rendement d'une récolte est déterminée par l'élément qui se trouvent en plus faible quantité par rapport aux besoins de la culture». Dans un sol déséquilibré en éléments minéraux, le rendement de la culture est donc **limité** au niveau permis par l'élément présent en plus faible quantité, même si tous les autres se trouvent en quantités suffisantes. **L'analyse de sol permet généralement de découvrir ce facteur limitant.**

Cette loi met aussi en évidence **l'interdépendance entre les différents éléments nutritifs** et la nécessité de les positionner à leur optimum au sein du système «Sol - Plante». De telles **interactions** existent entre tous les facteurs de production : N et l'irrigation, N et le désherbage, N et les fongicides, fertilisation et structure du sol.

En ce qui concerne les éléments fertilisants, une interaction est également susceptible d'apparaître :

- *dans le sol* : certaines formes d'éléments facilitent la mobilisation d'un autre élément ; ainsi le sulfate et le nitrate d'ammonium favorisent la solubilisation du  $P_2O_5$  en sols alcalins ;
- *dans la nutrition minérale du végétal* : ainsi, l'absorption d'une partie de l'azote sous forme de  $NH_4$  favorise les prélèvements de  $P_2O_5$  par le végétal.

### 2.3.3. Principes de la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS)

Au cours des trois dernières décennies, la conception qui sous-tend la gestion des nutriments dans les systèmes de culture en Afrique sub-saharienne a connu une mutation considérable à la faveur de connaissances améliorées, fondées sur des recherches approfondies sur le terrain, ainsi que sur des mutations dans l'environnement général social, économique et politique de l'Afrique sub-saharienne.

Dans les années 1960 et 1970, une attention particulière a été portée sur l'utilisation des engrais minéraux pour une nutrition adéquate des cultures et une amélioration du rendement. Au cours des années 1980, l'accent a été plus fortement mis sur l'usage des ressources organiques, en partie à cause des problèmes d'accès aux engrais en Afrique sub-saharienne pendant cette période. Aujourd'hui, **beaucoup de recherches ont démontré l'importance de combiner l'utilisation des engrais minéraux et des matières organiques** de manière à les adapter aux conditions locales pour obtenir des rendements satisfaisants et une utilisation efficiente des engrais. Cela constitue l'essence même de la *Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols* (GIFS) (CAB International, 2015).

## Engrais et matière organique ne s'opposent donc pas mais se complètent !

Tableau 3 - Changements des paradigmes de gestion de la fertilité des sols tropicaux au cours des cinq dernières décennies (Source : CAB International, 2015) :

Période	Approche	Rôle de l'engrais	Rôle des intrants organiques	Expérience
Années 1960 et 1970	Utilisation d'intrants externes.	Utilisation des engrais seuls considérée suffisante pour améliorer et maintenir les rendements.	Les ressources organiques jouent un rôle minimal.	Succès limité en raison des lacunes au niveau des infrastructures, des politiques et des systèmes de culture.
Années 1980	Utilisation des intrants organiques.	L'engrais joue un rôle minimal.	Les ressources organiques sont la principale source de nutriments.	Adoption limitée. La production de la matière organique exige du bétail, de grandes étendues de terres et de la main-d'oeuvre
Années 1990	Utilisation combinée d'engrais et de résidus organiques.	Utilisation d'engrais essentielle pour alléger les contraintes principales liées aux nutriments.	Les ressources organiques sont le principal « point d'entrée » pour l'amélioration de la fertilité des sols et jouent d'autres rôles outre l'apport de nutriments.	Adoption localisée pour des cultures spécifiques
Années 2000	Gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS).	Les engrais sont le principal point d'entrée pour accroître les rendements et apporter les ressources organiques nécessaires.	Les ressources organiques peuvent améliorer l'efficacité de l'usage des engrais.	Objectif d'une adoption à grande échelle!

Toutes les preuves scientifiques indiquent que, sur les sols appauvris d'Afrique subsaharienne, **on ne peut pas accroître la production sans apporter aux champs des nutriments externes** soit par le biais de fumier animal ou d'engrais minéraux. Mais la gestion de ces intrants doit se fonder sur des principes agronomiques, écologiques et économiques rationnels.

Il faudrait un manuel entier pour décrire la GIFS. Nous nous limiterons à en présenter les grands principes et nous reverrons à des ouvrages spécialisés comme « *Le Manuel de la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols* » édité par l'AFRICA Soil Health Consortium (CAB International, 2015) dont nous avons extrait les éléments éclairants ci-dessous.

La GIFS peut être définie comme étant « *un ensemble de pratiques de gestion de la fertilité du sol qui impérativement passent par l'utilisation des engrais, des intrants organiques et de germoplasme amélioré<sup>28</sup>, combinée avec les connaissances sur la façon d'adapter ces pratiques aux conditions locales, pour l'optimisation de l'efficacité agronomique des nutriments appliqués et l'accroissement du rendement des cultures* ». La GIFS consiste donc en **l'usage combiné d'interventions appropriées en gestion des sols, utilisation d'engrais et gestion des cultures** en vue de stimuler les principaux extrants que sont un rendement et une productivité améliorés.

L'introduction des « interventions » (on entend par intervention, notamment : rotation ou cultures intercalaires, travail du sol, conservation des sols, usage du fumier de ferme, gestion des résidus de culture, calendrier d'application des engrais, choix des variétés cultivées, gestion de l'eau, gestion des bioagresseurs,...) est tributaire des forces du marché et des politiques gouvernementales. **Quand cette introduction est réussie, la productivité s'améliore et on a besoin de moins de terres** pour atteindre un niveau donné de production. Le résultat est une amélioration durable de la sécurité alimentaire, avec plus de revenus pour les paysans et une réduction des prix des denrées alimentaires, au profit de la population urbaine.

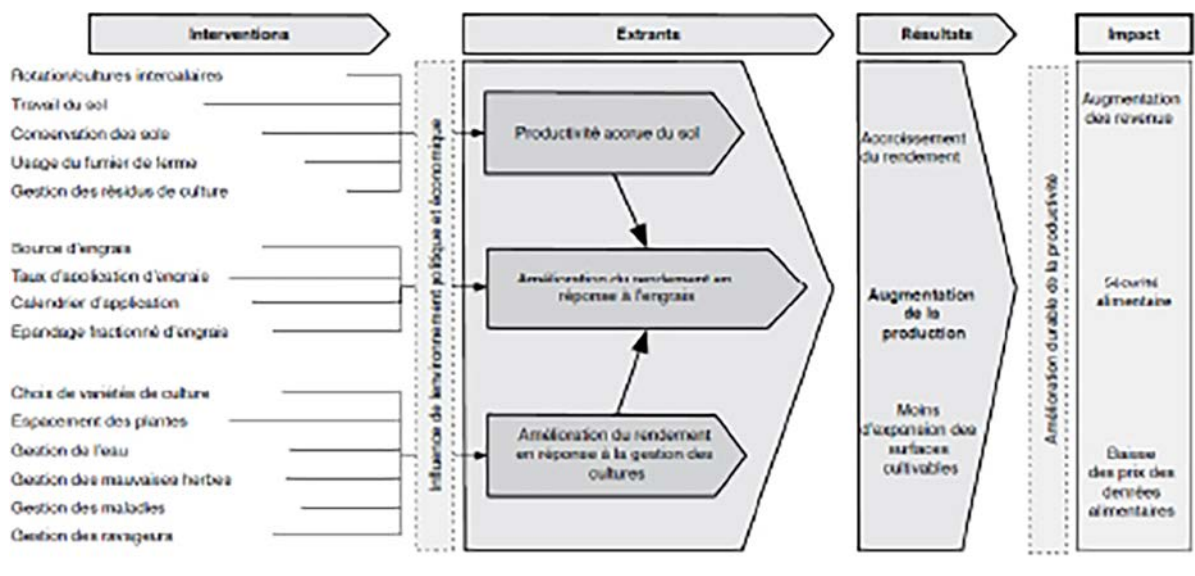


Figure 12 - Comment fonctionne la GIFS.

28 C'est-à-dire : variété ou plantule avec une capacité de réponse aux nutriments (les variétés diffèrent en ce qui concerne leur capacité de réponse aux nutriments apportés); adaptation à l'environnement local (sols, climat); et résistance aux ravageurs et aux maladies.

### 2.3.4. Les éléments fertilisants

#### 2.3.4.1. Les engrais

Les engrais sont des sources concentrées de nutriments essentiels qui sont sous une forme facilement assimilable par des plantes.

Selon le nombre d'éléments majeurs apportés, les engrais minéraux sont classés en :

- **Engrais simples** : n'apportant qu'un seul des trois éléments fertilisants majeurs. Ils peuvent contenir en plus certains éléments secondaires (Ca, S, oligoéléments...)
- **Engrais composés** : en apportent deux ou trois en même temps. Ce sont les engrais binaires (NP, NK, PK) ou ternaires (NPK). Ils sont formés de mélanges d'engrais simples ou sont obtenus en faisant réagir des matières premières entre elles. Les engrais composés sont désignés par une formule de trois nombres, représentant dans l'ordre N-P-K la quantité de chacun de ces éléments contenus dans 100 kg d'engrais solide ou dans 100 litres de solution s'il s'agit d'un engrais liquides.

Les engrais se présentent sous diverses formes : sous forme solide (en granulés, cristallisés, concassés, en perles ou en poudre), en solution (solution azotée, solution binaire, solution ternaire) ou sous forme de gaz liquéfié. Cependant, les engrais sont **le plus souvent fournis à l'état solide**.

Les **engrais organiques** proviennent des **matières premières d'origine animale ou végétale**. Certaines de ces matières premières peuvent être utilisées seules et sans transformation, sinon après de simple dessiccation ou broyage : les tourteaux, les fientes de volailles séchées, le sang desséché, les farines de poisson, les poudres d'os, les cornes broyées ou torréfiées, le guano. Ces engrais ne sont pas solubles dans l'eau, mais la majeure partie des éléments qu'ils contiennent est rapidement minéralisable et disponible pour les plantes. Ils apportent principalement de du N-P-K, mais aussi du S, Ca et Mg et des oligoéléments.

Les **engrais verts** sont **des plantes de couverture** qui au cours de leur cycle de vie produisent de la biomasse tout en couvrant la surface du sol (cf. également le Chapitre 5). En réalité, les engrais verts sont des plantes vertes (ou des parties de plantes) non ligneuses qui ont poussé après ou en même temps que la culture principale, une mauvaise herbe provenant de la période de jachère, ou encore des feuilles d'un arbre ou d'une plante d'ombrage qu'on a taillées ou qui sont tombées. La préférence est généralement donnée aux « légumineuses » (plantes de la famille des Fabacae). En Afrique, plusieurs espèces de légumineuses annuelles à graines non comestibles comme le pois mascate (*Mucuna pruriens* var *utilis*), le Kudzu (*Puerovia phaseoloides*) ou le lablab (*Lablab purpureus* L.) sont utilisées comme plante de couverture pour le contrôle de l'érosion hydrique, la lutte contre les adventices et la restauration de la fertilité du sol. Les atouts de l'usage des légumineuses comme engrais verts ou plantes de couverture sont nombreux :

- elles enrichissent le sol avec l'azote biologiquement fixé ;
- elles conservent et recyclent les nutriments du sol ;
- elles fournissent une protection du sol favorisant la réduction de son érosion ;
- elles requièrent peu ou pas d'engrais minéraux immédiats.



A intervalles planifiés, on a besoin de travailler le sol pour favoriser l'établissement, la maintenance et l'incorporation de ces engrais verts (IFDC, 2002).

Les **annexes 1 et 2** présentent, sous forme de tableaux, les apports en divers éléments (N, P, K et autres des principaux types d'engrais utilisés par les producteurs.

Les engrais minéraux sont souvent moins coûteux que le fumier animal en termes de coûts des éléments nutritifs qu'ils contiennent (€/kg de nutriment) ou que les composts, mais ils sont souvent considérés plus coûteux par les agriculteurs parce qu'ils exigent un paiement au comptant. Néanmoins en Afrique, bien que la majorité des agriculteurs considèrent à juste titre les engrais comme étant «fort coûteux» (au Bénin par exemple, le coût des fertilisants peut représenter jusque 70% des charges en maraîchage), les agriculteurs apportent les engrais minéraux en excès sur leurs cultures de légumes, provoquant parfois une acidification des sols.

Le prix des engrais minéraux a augmenté à la suite de la suppression des subventions. Jusqu'à présent, les engrais coûtent plus chers dans la majorité des pays d'Afrique sub-saharienne que nulle part ailleurs, essentiellement **en raison du manque d'infrastructures efficaces** pour le marché des engrais et des mauvais réseaux de transport. En 2006, dans la Déclaration d'Abuja adoptée par le Sommet de l'UA sur les engrais en Afrique, les décideurs ont souhaité accroître le niveau d'utilisation d'engrais de la moyenne annuelle de 8 kilogrammes d'éléments nutritifs par hectare (en 2006) à au moins 50 kilogrammes par hectare (pour 2015), réduire les coûts d'achat des engrais aux niveaux régional et national, améliorer l'accès des agriculteurs aux engrais en développant et en multipliant les réseaux de distributeurs d'intrants et ceux des communautés locales dans les régions rurales, etc. Force est de constater qu'on est encore loin d'atteindre tous ces objectifs.

#### *2.3.4.2. Les facteurs de succès de la fertilisation*

Les plantes prélèvent les éléments minéraux du sol pour produire les composés organiques. Il est établi que **plusieurs éléments sont nécessaires pour le fonctionnement normal de la plante**. De plus, les éléments nutritifs doivent être disponibles et présents **sous une forme assimilable** pour que les végétaux puissent les absorber par leurs racines.

Le succès de l'utilisation et de la combinaison des engrais chimiques et des fertilisants organiques dépend d'un certain nombre éléments :

- un **équilibre satisfaisant** doit exister entre les principaux modes d'utilisation des terres (forêts, pâturages et cultures), en tenant compte des caractéristiques des sols, de l'exploitation et de la nécessité d'équilibrer les productions de l'entreprise agricole ;
- il est **nécessaire d'avoir un plan de culture** soigneusement étudié. Il arrive qu'en certains endroits une plante puisse croître plusieurs années de suite sur une même terre. Mais les meilleurs résultats sont généralement obtenus en **pratiquant des successions de cultures** ou **des rotations**, qui peuvent comprendre des cultures de légumineuses à racines profondes, ou même des cultures mixtes de deux ou plusieurs plantes ;

- les **façons culturales** doivent avoir pour objet de préparer le sol en vue de pratiquer des semis d'une manière appropriée et en temps opportun, en rendant le sol plus perméable à l'eau, en incorporant en profondeur au besoin les matières organiques, la chaux et les engrais, et en détruisant les mauvaises herbes ;
- il est nécessaire d'adopter un procédé pour **la conservation et l'utilisation des matières organiques** ;
- le système d'emploi des engrais devra être choisi en même temps que les autres pratiques, de façon à **assurer la combinaison des cultures la plus satisfaisante** et obtenir des rendements élevés. Ce système devra tenir compte notamment de toutes les cultures faisant partie de la rotation ou de la culture mixte ainsi que des ressources de l'exploitation en fumier ;
- sur les sols acides, **le chaulage est généralement nécessaire** pour permettre la croissance de différentes cultures et pour faire acquérir au sol les caractéristiques favorables à l'utilisation des éléments nutritifs. Le chaulage est souvent pour ces sols, la première condition à laquelle doit satisfaire un système rationnel de culture. Toutefois le chaulage doit être appliqué avec précaution, car un chaulage excessif présente des effets néfastes sur l'assimilation des éléments nutritifs.

Les résultats des essais agronomiques sur le long terme effectués dans différents pays montrent que le sol peut être appauvri en certains nutriments lorsque l'utilisation des engrais est déséquilibrée ; par exemple quand des quantités importantes d'engrais azotés sont appliquées sans les quantités requises d'engrais contenant les P, K et autres nutriments. Néanmoins, ces **problèmes peuvent être corrigés ou prévenus par la GIFS**. La GIFS insiste sur l'utilisation d'engrais minéraux dans les champs où ils peuvent produire un meilleur effet au sein d'une même exploitation.

#### *2.3.4.3. Les divers éléments chimiques indispensables à la nutrition des plantes*

De nos jours, on connaît plus de 100 éléments chimiques ; mais **seulement 17 sont considérés essentiels** en raison de leur importance pour la croissance et le développement des plantes. Parmi ces 17 éléments chimiques essentiels, **le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont prélevés à partir de l'air et de l'eau**. Les 14 autres éléments sont normalement absorbés par les racines de la plante à partir du sol. Ces éléments sont classés en trois catégories :

- les éléments **essentiels majeurs** : Azote, Phosphore et Potassium (N, P, K) ;
- les éléments **secondaires** : Calcium, Magnésium et Soufre ;
- les **oligo-éléments** : Fer, Zinc, Manganèse, Cuivre, Bore, Molybdène, Chlore et Nickel.

Un élément essentiel doit présenter les caractéristiques suivantes :

- en l'absence d'élément essentiel, la plante ne peut pas vivre son cycle, même si tous les autres éléments sont présents et que l'environnement est favorable ;
- cet élément doit être irremplaçable ;
- il doit être intéressé directement l'une ou l'autre réaction essentielle du métabolisme ;

- incorporé au milieu de culture, injecté ou pulvérisé, l'élément supposé essentiel doit faire disparaître les symptômes de carence foliaire ou autres imputés à son absence et plus encore, emmener la plante à sa croissance maximale dans les limites imposées par tous les facteurs physiques ou autres.

La diversité et l'importance des fonctions remplies par les éléments minéraux confirment la nécessité de s'assurer de la disponibilité de ces éléments en quantités suffisantes pour une production optimale des cultures.

Tableau 4 - Les éléments nutritifs, leurs formes d'absorptions et leurs fonctions.

Élément	Formes d'absorption	Fonctions principales
Azote	$\text{NO}_3^-$ , $\text{NH}_4^+$	Constituant des composés principaux des cellules, des protéines, de la chlorophylle et des gènes
Phosphore	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{HPO}_4^{2-}$	Constituant des gènes, rôle central dans le transfert d'énergie dans la plante et dans le métabolisme des protéines.
Potassium	$\text{K}^+$	Aide dans la régulation osmotique et ionique; important pour plusieurs fonctions enzymatiques et dans le métabolisme des protéines et des carbohydrates.
Calcium	$\text{Ca}^{2+}$	Impliqué dans la division cellulaire et joue un rôle majeur dans le maintien de l'intégrité de la membrane.
Magnésium	$\text{Mg}^{2+}$	Constituant de la chlorophylle, et facteur dans plusieurs réactions enzymatiques.
Soufre	$\text{SO}_4^{2+}$	Constituant des protéines, des amino acides et des vitamines. Nécessaire pour la production des plantes à essences.
Fer	$\text{Fe}^{2+}$	Constituant de plusieurs enzymes comme le cytochrome et la ferrédoxine impliquée dans la fixation d'azote et la photosynthèse.
Zinc	$\text{Zn}^{2+}$	Nécessaire pour le fonctionnement correct de plusieurs systèmes enzymatiques importants pour la synthèse des acides nucléiques et dans le métabolisme de l'auxine.
Manganèse	$\text{Mn}^{2+}$	Composant de plusieurs enzymes telles que celles impliquées dans la photo synthèse.
Cuivre	$\text{Cu}^{2+}$	Composant de plusieurs enzymes nécessaires pour la photosynthèse.
Bore	$\text{H}_3\text{BO}_3$	Rôle important dans la migration et l'utilisation des glucides. Intervient dans la croissance méristématique.
Molybdène	$\text{MoO}_4^{2+}$	Requis pour l'assimilation normale de l'azote. Nécessaire pour la fixation d'azote et pour la chlorophylle.

Chlore	Cl <sup>-</sup>	Essentiel pour la photosynthèse et pour la régulation osmotique des plantes qui se développent dans des sols salins.
Nickel	Ni <sup>2+</sup>	Constituant de l'enzyme uréase chez les légumineuses. Nécessaire pour que les plantes puissent compléter leur cycle de développement.

Nous passerons en revue certains de ces éléments (éléments essentiels majeurs).

#### 2.3.4.4. L'azote (N)

##### Formes de l'azote dans le sol

Dans le sol, l'azote se trouve essentiellement **sous trois formes**: **organique, ammoniacale et nitrique**. L'azote est assimilé par la plante sous la forme nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ou ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

Les plantes peuvent utiliser ces deux formes à la fois dans leur processus de croissance. Cependant, la partie la plus importante de l'azote absorbée par la plante l'est sous forme de nitrate. Cet ion est mobile et circule avec la solution du sol vers les racines de la plante. Sous certaines conditions de température, d'aération, d'humidité et de pH, les microorganismes du sol changent toutes formes d'azote en nitrate.

La **forme organique** représente presque **95% de l'azote total du sol**, notamment sous forme de matière organique. Cet azote est **minéralisé progressivement sous l'action de la flore microbienne** (1 à 2% par an) pour se retrouver en fin d'évolution sous forme nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

Les **formes inorganiques** rencontrées dans le sol sont constituées par l'azote nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), l'azote ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), l'azote gazeux (N<sub>2</sub>) et l'oxyde d'azote (NO<sub>2</sub>). La fraction d'azote minéral dans le sol représente moins de 5% de l'azote total. L'azote minéral se trouve principalement sous forme d'ammonium et de nitrate. La forme ammoniacale (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) est le résultat de la première transformation de l'azote organique du sol. Cette forme est soluble dans l'eau et bien retenue par le pouvoir adsorbant du sol, elle est transitoire et sera transformée ensuite en azote nitrique. **La forme nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) est la plus accessible aux plantes, mais aussi la plus mobile dans le sol et par conséquent la plus lixiviable** (avec une contamination possible de la nappe phréatique).

L'absorption de l'ammonium ou des nitrates dépend des conditions du milieu. L'ion ammonium peut inhiber l'absorption des nitrates. Lorsque les deux formes sont présentes à des concentrations égales, l'absorption de l'ammonium par les plantules de blé dépasse généralement celle des nitrates. Par ailleurs, l'absorption de l'une ou de l'autre forme dépend de l'espèce et de l'âge de la plantule. Les céréales préfèrent la forme ammoniacale durant les premières phases de leur croissance.

##### Sources de l'azote

- **Le sol**: la première source d'azote utilisée par les plantes est l'azote du sol. En absence de tout apport d'engrais les plantes non fixatrices d'azote utilisent l'azote du sol durant leur cycle physiologique. Même les plantes fixatrices

d'azote atmosphérique utilisent d'abord l'azote de la semence et du sol durant la première phase de la croissance. C'est par minéralisation que la matière organique du sol libère l'azote utilisable par les plantes.

- **Les engrais organiques:** les résidus organiques laissés sur le sol après les récoltes constituent une litière temporaire. Dans les systèmes de culture traditionnelle d'Afrique de l'Ouest, environ 50% des résidus de récolte sont consommés par les animaux pendant la saison sèche. Quand ils sont enfouis en début de saison, ces résidus enrichissent la fraction légère de la matière organique du sol. Les amendements organiques incorporés aux sols sous forme de fumier ou de compost, ainsi que les engrais verts, viennent également enrichir la fraction légère et constituent une source d'azote et d'humus.
- **Les engrais minéraux:** l'azote du sol et des amendements organiques ne suffisent pas pour atteindre des rendements optimaux. Des engrais minéraux azotés sont utilisés comme complément d'azote pour augmenter les rendements et intensifier la production végétale. L'utilisation des engrais minéraux est relativement faible en Afrique de l'Ouest. Comparativement aux pays développés et aux autres pays en voie de développement où les doses annuelles d'engrais minéraux appliqués peuvent atteindre 500 kg ha<sup>-1</sup>, l'agriculture des pays d'Afrique Subsaharienne utilise moins de 10 kg ha<sup>-1</sup> d'engrais minéraux. Environ 80% des engrais utilisés en Afrique subsaharienne sont importés et la principale cause de cette faible utilisation des engrais est leurs coûts relativement élevés comparativement aux faibles revenus des producteurs.
- **Les plantes fixatrices d'azote:** la plus grande partie de l'azote de la biosphère se trouve dans l'atmosphère. Par la symbiose entre les bactéries réductrices de l'azote atmosphérique, une grande partie des légumineuses utilisent principalement l'azote provenant de l'atmosphère. Les légumineuses tropicales comme niébé (*Vigna unguiculata*), l'arachide (*Arachis hypogaea*) et le soja (*Glycine max*) peuvent fixer respectivement 32 à 89, 22 à 92 et 0-95% de leur besoins en azote dans l'atmosphère. Comme on le constate, les quantités d'azote fixé sont très variables d'une espèce à l'autre et pour une même espèce car l'activité symbiotique est influencée par les souches bactériennes, l'espèce végétale et les facteurs du milieu.

### Carence et abondance de l'azote dans la plante

En situation de carence azotée, les plantes restent chétives, les feuilles se dressent, deviennent plus raides et tournent au vert-clair, le pétiole et les nervures sont plus prononcées à cause du retard de développement des parties succulentes.

L'azote est un élément fondamental pour le développement du végétal; principal constituant de la chlorophylle et des protéines, il stimule la croissance des plantes. Un sujet bien nourri en azote arbore un feuillage large de couleur vert foncé et de belles tiges.

En cas de manque d'azote, la plante présente une croissance retardée, des tiges et des feuilles de petit format, les feuilles les plus anciennes qui jaunissent, puis qui tombent. Les tiges peuvent parfois rougir. La floraison et la fructification sont également touchées (fruits petits, de qualité médiocre et mûrs précocement).





Figure 13 - Fraisiers manquant l'azote

En situation d'abondance azotée, les feuilles sont vert-foncées, les plantes sont succulentes et très digestibles et il y a réduction des parties ligneuses. La maturité et par conséquent la récolte sont retardées car l'azote stimule la croissance végétative au détriment des organes de reproduction. En cas d'excès d'azote, les plantes sont sujettes à la verse.

### Pertes d'azote

Trois phénomènes occasionnent des pertes et des transferts d'azote minéral: la volatilisation, la dénitrification et les transferts d'eau.

- **Volatilisation:** l'ammonium peut être volatilisé sous forme d'ammoniac. L'importance de la volatilisation dépend des facteurs climatiques: humidité et température ainsi que de facteurs pédologiques (pH, teneur en azote et en matières organiques). Les pertes sont faibles si la capacité d'échange du sol (CEC) est supérieure à 20 méq/100g (ce qui est le cas quand il y a une bonne teneur en matière organique dans le sol) et quand l'humidité est élevée. Elles sont élevées en sols alcalins à pH supérieur à 8; elles sont accrues par les alternances humectation dessiccation et une température supérieure à 15°C. Les pertes sont surtout notables après un épandage d'urée, d'ammoniac anhydre ou d'effluents d'élevage. L'incorporation permet de les réduire<sup>29</sup>.

29 La pollution azotée de l'air par l'agriculture (dont l'élevage) prend principalement la forme d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et de nitrates (NO<sub>3</sub>). La volatilisation de l'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote) et de l'ammoniac constitue la voie principale de perte d'azote lors de l'épandage d'effluents d'élevage (lisier, fumier...) ou d'engrais riches en ammonium comme l'urée [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>] ou l'ammonitrate (engrais azoté minéral à base de nitrate d'ammonium, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>). Pour plus d'information voir COLEACP, Manuel sur la Gestion durable de l'air.

- **Dénitrification**: les pertes par dénitrification se produisent sous forme de composés oxygénés volatils ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ) ou d'azote gazeux ( $\text{N}_2$ ). Leur importance est difficile à évaluer; on admet qu'elles sont faibles (10 à 15%) sauf en conditions anaérobies. En travail du sol simplifié, les conditions créées tendraient à les accentuer.
- **Lixiviation des nitrates**: les transferts d'eau, ruissellement, transfert hypodermique, lixiviation sont à l'origine de pertes d'azote. Une fraction limitée d'azote organique est entraînée par les eaux de ruissellement. Les ions nitriques et ammonium dissous peuvent être lixiviés. La lixiviation se produit surtout en périodes froides lorsque la capacité de rétention du sol est dépassée et éventuellement durant la période de végétation. La quantité d'azote lixivié dépend de la capacité de rétention du sol, de l'importance de l'eau drainante et de la concentration nitrique de la solution du sol. Les nitrates sont réellement perdus lorsqu'ils sont hors de portée des racines.

### Moyens de lutte contre les pertes d'azote

Les principaux moyens de limiter les pertes d'azote sont :

- L'optimisation des fumures azotées;
- Le fractionnement des apports;
- L'installation d'un couvert végétal durant la saison pluvieuse;
- L'enfouissement des pailles;
- La limitation des apports d'eau.

Les nitrates accompagnent aussi l'eau dans ses déplacements ascendants, l'évaporation par exemple. Le phénomène n'a d'importance réelle qu'en climat chaud.

#### 2.3.4.5. *Le potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ )*

Le potassium est **absorbé par la plante sous sa forme ionique  $\text{K}^+$** . Il est essentiel pour la translocation des sucres et pour la formation de l'amidon. Il intervient dans la régulation osmotique et ionique, ainsi que dans le processus d'ouverture et de fermeture des stomates. Le potassium est nécessaire pour plusieurs fonctions enzymatiques et pour le métabolisme des protéines et des carbohydrates.

### Formes du potassium dans le sol

Pour raisonner la fertilisation potassique, il est nécessaire de **connaître la dynamique du potassium dans le sol** ainsi que les modalités de l'alimentation potassique des plantes. Dans le sol, le potassium se trouve sous **quatre formes principales** de valeur inégale pour la plante. Celles-ci seront traitées ci-après en allant des formes immédiatement disponibles pour la plante à celles qui le sont le moins, soit respectivement: le potassium dans la solution du sol, le potassium adsorbé, le potassium à l'intérieur des réseaux cristallins et le potassium non échangeable.

- **Le potassium dans la solution du sol**: le potassium dans la solution du sol est directement absorbé par la plante. Cette fraction du potassium est la plus faible et la plus variable dans le sol. La vitesse de réapprovisionnement de

la solution du sol en potassium est une caractéristique intrinsèque du sol. Cette capacité est appelée le «pouvoir tampon». Quand les plantes puisent leurs besoins en potassium du sol par absorption racinaire, les sols argileux réapprovisionnent plus rapidement la solution du sol en cet élément que les sols sableux.

- **Le potassium adsorbé** : il existe un équilibre entre le potassium de la solution du sol et celui qui est adsorbé sur le complexe d'échange cationique, les deux états constituent un tout utilisable pour l'alimentation de la plante : C'est le potassium échangeable ou assimilable. Le potassium échangeable correspond à la quantité de  $K^+$  de la solution du sol et celle adsorbée au complexe d'échange et qui est extractible avec une solution d'acétate d'ammonium normale et neutre. En utilisant l'acétate d'ammonium, 95% du potassium adsorbé au complexe argileux humique du sol peuvent être extraits.
- **Le potassium à l'intérieur des réseaux cristallins** : c'est le potassium interne qui intervient plus difficilement dans l'alimentation de la plante. En effet, les ions  $K^+$  ne restent pas tous adsorbés à l'extérieur du complexe d'échange, ils peuvent aussi pénétrer à l'intérieur entre les feuillets d'argile. On dit alors que le potassium est rétrogradé ou fixé sous forme non échangeable. Mais quand le potassium repasse à l'extérieur du complexe, il redevient utilisable par la plante : on dit alors que le potassium est régénéré. Cette forme du potassium peut dans certaines conditions contribuer de manière très significative à l'alimentation des plantes.
- **Le potassium non échangeable** : les formations cristallines et volcaniques sont généralement riches en potasse (2 à 7% dans les feldspaths du granite), mais cette potasse se trouve sous forme pratiquement insoluble donc inutilisable par la plante. Toutefois, sous l'action des agents atmosphériques et des racines, une petite fraction pourrait être mise à la disposition des plantes.

### Sources de potassium dans le sol

Le potassium est **apporté par les engrais**, mais il l'est aussi **par les résidus des cultures** (résidus des cultures de légumes verts, pailles,...), les composts, les effluents d'élevage (fumiers et lisiers de bovin ou de porcs) et les déchets d'origine urbaine et industrielle (les déchets ménagers sont très riches en potassium) (voir tableaux en annexe). Dans tous les cas, c'est le cation  $K^+$  qui est apporté au sol. Contrairement au phosphore, pour être disponible **le potassium n'a pas besoin de la décomposition microbienne**. Le potassium s'échappe des résidus par lessivage, lors des pluies, avant de s'infiltrer dans le sol. La quantité de potassium qui sort des résidus dépend des précipitations. Le potassium est **libéré au cours des processus de l'altération des minéraux** qui font intervenir des phénomènes de dissolution et de désorption.

### Carence et abondance du potassium dans la plante

Les symptômes visuels de déficience se caractérisent par des nécroses sur les feuilles les plus âgées.

Les plantes sont donc **peu développées**, le port est mou, **la bordure des feuilles varie du jaune au brun**, le limbe se couvre de **taches brunes**. Chez les fruitiers, les **feuilles les plus anciennes se crispent**.





Figure 14 - Carence en potassium chez un avocatier

Les apports massifs de potassium ainsi que des teneurs du sol en potassium trop élevées peuvent induire des carences en magnésium et en calcium (en effet le potassium est antagoniste d'autres cations: un niveau trop élevé d'absorption du potassium dans le sol se traduit par une moindre absorption du calcium ou du magnésium).

### Pertes

- **Lixiviation du potassium** : le lessivage du potassium dépend de la composition du sol: dans un sol sableux, le lessivage du potassium est relativement élevé, ce qui incite de faire des apports de fumure potassique supérieurs aux besoins des cultures. Dans un sol argileux (riche en illites et en vermiculites), le lessivage est par contre faible car ces minéraux fixent très fortement le potassium. Le lessivage est **sous la dépendance de la teneur en colloïdes, de la nature des argiles, de saturation en potassium, et de la pluviométrie**. Dans les régions de l'Afrique tropicale, les terres agricoles sont perdues en raison de leur mauvaise exploitation (drainage, feu de brousse,...) engendrant des pertes en  $K^+$  (Stoorvogel *et al.*, 2009 cités par Maba, 2007). Ces pratiques ont mené certains auteurs à qualifier l'agriculture de ces régions « *d'agriculture minière* » car dans ces systèmes d'exploitations, les sorties dépassent les entrées.
- **Exportation du potassium par les récoltes** : varie beaucoup avec les espèces cultivées et les rendements.

## Moyens de lutte

- Le fractionnement des apports ;
- L'installation d'un couvert végétal durant la saison pluvieuse ;
- L'enfouissement des pailles ;
- La limitation du drainage.

### 2.3.4.6. Le phosphore ( $P_2O_5$ )

#### Formes du phosphore dans le sol

Dans un sol sous végétation, **le phosphore se trouve surtout sous forme minérale** : cristalline (apatite-phosphorite), amorphe (vivante) ou colloïdale, c'est-à-dire provenant de l'apatite par altération climatique et entourant les particules colloïdales du sol et aussi provenant de la minéralisation des matières organiques.

De fait, la teneur en phosphore d'un sol croît avec la finesse de la texture ; l'argile en contient relativement plus que le sable. Dans un sol couvert de végétation, le phosphore se trouve **principalement sous forme organique**, libérée par **décomposition microbienne** de cette matière organique et se trouve **surtout dans la couche arable**, vu la faible diffusibilité du phosphore dans le sol.

- **Le phosphore insoluble des roches mères** : il représente la très grande majorité du phosphore total du sol, forme quasiment inutilisable par la plante. Mais, c'est la réserve générale à partir de laquelle une petite fraction parviendra au bout de la chaîne dans les solutions du sol, à la suite de nombreuses et lentes transformations de nature physico-chimiques ou biotiques.
- **Le phosphore lié aux constituants organiques** : dans ce cas, le phosphore se trouve engagé dans des structures moléculaires organiques plus ou moins stables et non assimilables par la plante. L'humus intervient dans l'alimentation phosphorique en limitant l'évolution de l'acide phosphorique vers des formes plus difficilement assimilables par le végétal, notamment en sol calcaire.
- **Le phosphore lié aux constituants minéraux** : les ions phosphoriques peuvent être fixés sur le complexe argilo-humique, particulièrement sur les argiles. L'augmentation de la teneur en argile diminue le coefficient de diffusion du phosphore à cause de l'augmentation des sites d'adsorption à la surface des particules. Le  $P_2O_5$  adsorbé ne représente qu'une faible partie du phosphore total. **Il constitue la majeure partie du phosphore assimilable ou échangeable qui, suivant les sols peut atteindre 300 à 500 Kg/ha.** Dans les sols calcaires, les ions phosphore solubles s'insolubilisent très progressivement sous forme de phosphates tricalciques et pour une faible part sous forme d'apatite.
- **Le phosphore de la solution du sol** : C'est la fraction du phosphate total la plus faible et en même temps la plus importante pour l'alimentation de la plante. Le phosphore se trouve sous les deux formes  $H_2PO_4^-$  et  $HPO_4^{2-}$  qui sont dominantes dans la solution du sol. La solubilité des minéraux de phosphore et la concentration des sols en  $H_2PO_4^-$  et  $HPO_4^{2-}$  sont fortement dépendantes du pH. L'ensemble des deux dernières formes de phosphore (celui de la solution



du sol et celui adsorbé sur le complexe) représente le pool alimentaire qui constitue la fraction du phosphore total considéré comme la principale réserve alimentaire. Elle correspond au phosphore assimilable ou échangeable.

### Sources du phosphore dans le sol

Les exploitants agricoles apportent le phosphore via les engrais organiques (le phosphore est présent naturellement dans les déchets animaux et végétaux). La minéralisation des résidus végétaux sous l'effet de l'activité microbienne augmente la teneur du sol en phosphore assimilable (phosphore labile et phosphore dissous). Seul le phosphore du complexe argilo-humique est rapidement disponible (0,2 à 1 kg de  $P_2O_5$  par hectare). C'est un élément **peu mobile dans le sol** et pour cette raison, il est préférable de le placer précisément là où les racines le prélèvent. Les **mycorhizes** jouent souvent un rôle fondamental dans l'absorption du phosphore par la plante. Ces dernières en sécrétant des enzymes sont capables d'absorber un phosphore fixé par le sol (forme non assimilable par la plante directement) pour le transmettre ensuite à la plante en contrepartie de sucres provenant de la photosynthèse (symbiose racinaire).

### Carence et d'abondance du phosphore dans la plante

La déficience en phosphore engendre un ralentissement de la croissance des plantes et une coloration pourpre dans les feuilles qui commence surtout dans les feuilles âgées.



Figure 15 - Carence en phosphore sur salades

La carence en phosphore peut se présenter sous un état bénin ou un état aigu. L'état bénin se manifeste par une réduction générale de la croissance ; la plante est plus élancée, le pétiole s'allonge, les nervures sont plus prononcées et les feuilles sont minces et se dressent. À l'état aigu, les feuilles jaunissent et se nécrosent avec un brunissement roux (non bronzé comme dans la carence potassique). Bien qu'on observe rarement des symptômes d'excès en phosphore dans la nature, cet excès se manifeste par une croissance limitée et un jaunissement chlorotique général.

### Pertes du phosphore du sol

En agriculture extensive, l'exportation annuelle est de 0,5% du P total du sol « couche arable » alors que l'exportation en N est de 1,4%. L'appauvrissement en P est donc moins prononcé que celui de N. En culture intensive, l'exportation est beaucoup plus élevée et doit être compensée par une fumure (ex : fumiers, lisiers ou certains composts qui sont riches en phosphore). Le phosphore du sol est perdu par :

- **Lixiviation** : elle est pratiquement inexistante à cause de la mobilité très réduite de P dans le sol. Ceci exige l'application des engrais phosphatés dans la zone des racines et fournir au sol les meilleures conditions biologiques pour augmenter l'activité des microorganismes.
- **Érosion** : le phosphore organique, le plus assimilable, se trouve surtout dans la couche arable. L'érosion provoque une perte importante de P et de N, qui peut être, dans les régions sujettes à l'érosion, plus importante que celle due aux exportations par les cultures. La lutte contre toute érosion s'impose du fait que le P de sous-sol se transforme très lentement en P assimilable après l'érosion.
- **Labilité** : quand il y a formation de complexes avec le phosphore, le rendant inaccessibles aux plantes. Dans les conditions tropicales, les latosols (nom donné à des sols de forêts tropicales présentant une teneur relativement élevée en oxydes de fer et d'aluminium) qui contiennent 16-41% de phosphate total, ne peuvent fournir que 0,2- 6% de phosphate assimilable à cause de la formation de complexes insolubles avec les (sesqui)oxydes de fer présents dans ces sols.

### Moyens de lutte

- La lutte contre l'érosion du sol ;
- Le fractionnement des apports ;
- L'installation d'un couvert végétal durant la saison pluvieuse ;
- L'enfouissement des pailles ;
- La limitation des apports d'eau.

## 2.4. RÔLE ET NATURE DES AMENDEMENTS DU SOL

### 2.4.1. Qu'est-ce qu'un amendement ?

Les amendements sont des produits de **nature minérale** (ex : sable) ou **organique** (compost, paille, tourbe,...) que l'on apporte au sol pour en modifier les caractéristiques physico-chimiques, c'est-à-dire **essentiellement la structure** (mode d'assemblage des constituants du sol) et le **pH**.

L'apport d'un amendement a pour but :

- d'améliorer les propriétés physiques du sol ;
- de neutraliser l'acidité du sol ;
- de restaurer le complexe absorbant ;
- de maintenir les colloïdes floculés.



SABLE POUR AMENDER UN SOL ARGILEUX



COMPOST POUR AMENDER UN SOL ARGILEUX



PAILLE POUR LIMITER LA FORMATION  
D'UNE CROÛTE EN SOL LIMONEUX



TOURBE POUR AMENDER UN SOL  
TROP CALCAIRE ARGILEUX

Dans les régions tropicales humides, le pH du sol tend à être de niveau faible, la réaction du sol tend à être acide du fait de l'effet lessivant des fortes pluies. L'acidification progressive des sols sous l'influence des processus naturels, de la production des plantes et des pratiques culturales amène à devoir gérer le statut acido-basique des sols. L'usage des amendements minéraux basiques permet de maintenir le pH à un niveau compatible avec une biodisponibilité satisfaisante des éléments minéraux et un état optimal de la composante physique de la fertilité. Ainsi, le **chaulage** permet d'amener les sols acides à une moindre acidité ou à la neutralité. Le calcaire broyé ( $\text{CaCO}_3$ ) est l'un des produits les plus efficaces et les moins chers qui peuvent être utilisés comme amendement des sols.

### 2.4.2. Comment choisir un amendement ?

Un produit aura une action amendante s'il libère des ions capables :

- de s'absorber sur le complexe en provoquant la désorption des protons  $H^+$  ;
- de neutraliser les protons libres préexistant et ceux libérés ;
- d'exercer dans la solution du sol une « pression » ionique pour flocculer les colloïdes.

De plus, le produit doit être abondant dans la nature pour être peu onéreux. Trop souvent, on n'attache d'importance qu'à la présence du calcium ou du magnésium ; tous les composés calciques ou magnésiens ne sont pas utilisables comme amendements. Pour neutraliser les protons, seuls sont utilisables (*les oxydes, les hydroxydes de calcium et de magnésium; les carbonates; et dans une moindre mesure les silicates et les phosphates*) et divers phénomènes entrent en jeu. Les oxydes basiques (oxydes de magnésium (MgO) ou de calcium (CaO)) se transforment en présence d'eau en hydroxydes (Ca(OH)<sub>2</sub> et Mg(OH)<sub>2</sub>), tous deux des bases assez fortes qui peuvent neutraliser les ions  $H^+$  sous forme d' $H_2O$ . Les carbonates (CaCO<sub>3</sub> ou MgCO<sub>3</sub>) agissent différemment, par l'intermédiaire du pouvoir tampon (dissociation du Ca ou Mg et du C et formation en présence d' $H^+$  de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ou Mg<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, acides faibles peu dissociés. C'est donc par la présence de cet acide non dissocié et de l'anion de cet acide faible que se marque la stabilisation du pH (ou pouvoir tampon).

Les principaux amendements minéraux apportent **du calcium** et **du magnésium**. Les amendements organiques des **matières organiques** destinées à entretenir ou à **enrichir le stock d'humus** du sol.

#### 2.4.2.1. Les amendements calcaires et magnésiens

Ils apportent du calcium et/ou du magnésium (dolomie, chaux vive...) dont ont besoin les plantes. On distingue les amendements « minéraux basiques » qui apportent du calcium et du magnésium et sont les plus utilisés, améliorent les propriétés des sols et régularisent le pH et les amendements « engrais » qui, en plus de leur action neutralisante, fournissent aux cultures au moins un autre élément que le calcium ou le magnésium.

Les **amendements calcaires** jouent un rôle physique, un rôle chimique et un rôle biologique. Le calcium joue un rôle physique, car il **rend la structure des sols plus meuble et plus stable**. Celle-ci favorise la perméabilité à l'eau et à l'air. Elle facilite le travail du sol et la pénétration des racines. Le calcium agit aussi sur la structure et sur sa stabilité en favorisant l'humification et la stabilisation du complexe argilo-humique. Le calcium joue un rôle chimique dans la mesure où il régularise le pH des sols et favorise les échanges d'ions. On n'oubliera pas le rôle du calcium dans la fixation réversible du phosphore. Enfin, le calcium et le magnésium jouent un rôle sur l'activité biologique dans les sols, surtout en créant des conditions préférentielles aux microorganismes du sol (mobilité des bases échangeables, pH neutre ou légèrement acide, bonne aération, humidité moyenne, etc.).

Apporter des amendements calcaire, c'est réaliser ce que l'on appelle le « chaulage » (cf. chapitre 5). On pourra utiliser des produits crus comme des calcaires broyés, des craies, de la dolomie, des marnes, des résidus industriels (sucrieries), du plâtre ou du gypse et divers engrais minéraux.



### 2.4.2.2. Les amendements organiques (ou humifères)

Ils permettent d'enrichir le sol en matière organique et certains fournissent aussi un grand nombre d'éléments minéraux. Les amendements organiques visent à compenser la fraction de la matière organique du sol qui se minéralise chaque année. Ils enrichissent le sol en matières organiques, en améliorent la structure et apportent des éléments nutritifs aux cultures.

Les amendements organiques sont des **composés carbonés** d'origine végétale ou animale et végétale en mélange dont la teneur en matière sèche est supérieure à 30% du produit brut. La teneur maximale en un des éléments majeurs (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ou K<sub>2</sub>O) est de 3%. La somme des trois teneurs doit être inférieure à 7% du produit brut (Nicolardot, 2014). Les amendements humifères sont constitués essentiellement par les fumiers, les lisiers, les purins, les déchets végétaux, les résidus de récolte, les engrais verts, les déchets ménagers fermentescibles et les boues de station d'épuration. Ces amendements n'ont pas tous la capacité d'améliorer le sol: les lisiers, au contraire des fumiers ou des composts, n'améliorent pas sensiblement la structure du sol. D'autres, comme les composts de déchets ménagers, peuvent apporter parfois des éléments toxiques (tels que des métaux lourds) et sont à utiliser avec prudence.

Les matières organiques mortes, promises à la décomposition et à l'humification, se classent en deux catégories :

1. Les matières organiques qui sont riches en sucres solubles et en azote, qui se décomposent vite, qui donnent une grande quantité de produits vite utilisés par les bactéries et **qui ne laissent pratiquement pas d'humus** (ex : engrais verts, lisiers).
2. Les matières organiques qui sont **riches en lignine** et beaucoup moins en azote. Ces matières organiques se décomposent lentement et conduisent surtout à la fabrication des précurseurs de l'humus (ex : paille, fumier pailleux).

Il y a **trois façons d'apporter** des matières organiques dans les sols qui **correspondent aux trois stades de décomposition** de la matière organique :

- la première consiste à apporter des **matières organiques fraîches** (engrais verts, débris végétaux et déjections animales) ;
- la seconde consiste à apporter des **composts**, c'est-à-dire des matières organiques ayant subi un début de décomposition active par des microorganismes (dans des conditions bien maîtrisées). Ces composts sont enrichis des corps microbiens et de leurs sécrétions ;
- la troisième façon consiste à apporter des **humus**, c'est-à-dire des matières organiques dont le stade de décomposition est suffisamment avancé pour qu'un début de restructuration moléculaire conduise à la fabrication des acides fulviques et humiques.



## LES MATIÈRES ORGANIQUES : UN TRIPLE RÔLE

### *Rôle énergétique*

La richesse en carbone et hydrogène des substances organiques permet par voie oxydative, la libération de quantités considérables d'énergie dont bénéficient les microorganismes du sol.

### *Rôle physique*

Les matières organiques contribuent à l'édification de la structure du sol : perméabilité, aération, teneur en eau, prospection par les racines. En particulier, des travaux de recherche ont montré le rôle privilégié des matières organiques jeunes dans la stabilité de la structure. Lorsque les débris végétaux sont incorporés au sol, ils sont rapidement colonisés par des populations microbiennes. La microflore, ses exsudats et ses produits de décomposition ont de fortes propriétés d'agrégation et les particules minérales y adhèrent. Ainsi les matières organiques sont relativement protégées au sein de ces agrégats. Le plus souvent, les teneurs en eau du sol augmentent avec la teneur en matière organique.



### *Rôle nutritionnel*

Les processus de minéralisation conduisent à la libération des éléments structuraux qui composent les substances organiques tels que l'azote, le phosphore ou le soufre. Pour l'azote, les matières organiques sont, avec la fixation de l'azote de l'air, les seules sources d'apports en agriculture biologique. La culture d'engrais verts et l'utilisation des engrais de ferme constitue la base des méthodes de maintien de la fertilité des sols en agriculture biologique. En l'occurrence, les légumineuses occupent une place prépondérante dans les rotations en bio comme moyen essentiel d'amélioration de la fertilité du sol.

*Chambres d'Agriculture de Bretagne - La fertilité des sols en agriculture biologique, Décembre 2011*

*Source : guide des matières organiques- ITAB*

Quel que soit le stade de décomposition auquel elles se trouvent, qu'elles soient facilement décomposables ou non, **les matières organiques améliorent toujours la structure du sol** dans lequel elles sont incorporées. Une granulation apparaît dans les horizons supérieurs du sol. L'incorporation de matière organique provoque une **prolifération bactérienne**, augmente les **sécrétions** des racines dont le développement est stimulé et **augmente notablement** la quantité de **complexe argilo-humique**. Ce sont ces facteurs qui, tôt ou tard, rendent la structure du sol grumeleuse. Cette structure grumeleuse sera encore plus fine si, sur un sol amendé, on y installe pendant une ou plusieurs années des graminées (ray-grass surtout) ou des légumineuses.

Elles ont aussi **d'autres effets bénéfiques** : elles diminuent l'érosion, ont un effet régulateur sur la température, permettent au sol de stocker davantage d'eau, contribuant ainsi à améliorer significativement la fertilité du sol. Cependant, la fumure organique seule ne suffit pas, souvent elle n'est pas disponible en grandes quantités pour assurer le niveau de production agricole escompté par l'agriculture. Elle doit être complétée par l'application d'engrais minéraux (FAO, 2003). Grâce à ces propriétés, les engrais organiques sont souvent à la base de l'obtention de meilleurs effets résultant de l'utilisation des engrais minéraux. La **combinaison d'engrais organiques et minéraux** (*Système Intégré de Nutrition des Plantes ou SINP*) crée ainsi les **meilleures conditions de nutrition des plantes**, car la matière organique, et donc les engrais organiques, améliorent les propriétés du sol alors que les engrais minéraux apportent aux plantes les éléments nutritifs qui leur sont nécessaires (FAO, 2003).

Cependant, apporter les éléments N, P et K via les engrais produits à la ferme (fumiers, lisiers, etc.) est **parfois plus coûteux** que via les engrais minéraux.

Par exemple, **l'azote apporté par un engrais vert revient souvent plus cher que l'urée, mais son coût s'exprime en travail et non en monnaie**. Une partie de l'azote contenu dans ces engrais est mise à la disposition des cultures dans l'année suivant l'épandage : c'est **l'effet direct**. L'effet direct dépend des quantités d'azote minéral et d'azote organique rapidement minéralisable contenues dans l'engrais. Plus cette fourniture est importante et rapide, plus l'effet sur la végétation est marqué. L'effet direct est évalué par un « coefficient d'équivalence azote engrais minéral » ( $Keq$  de l'azote total de l'engrais). Une autre partie sera disponible lentement, les années suivantes : c'est **l'effet indirect**.

L'efficacité pour le **phosphore** et du **potassium** est proche de celle des engrais minéraux. Pour le phosphore, le coefficient d'équivalence engrais représente la fraction de l'engrais qui a le même effet sur la culture qu'un engrais minéral phosphaté soluble dans l'eau et le citrate d'ammonium neutre. Le potassium est entièrement sous forme de sels minéraux, soluble à plus de 80% dans l'eau quelle que soit l'espèce animale. Sa disponibilité pour les cultures est donc analogue à celle d'un engrais minéral et son coefficient d'équivalence est égal à 1. La quantité à épandre dépendra des exigences des cultures, de leur valeur nutritive et de la disponibilité des éléments nutritifs.

**Tableau 5** : Coefficients d'équivalence engrais de l'azote, phosphore et potassium apportés par les engrais organiques (Source : Schwartz *et al.*, 2005).0

Engrais produits à la ferme	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Fumier de bovin	0,3	1	1
Fumier de porcs	0,3	1	1
Lisier de bovin	0,7	0,85	1
Lisier de porcs	0,5	0,85	1
Compost	0,1	1	1

## MESURER LES VALEURS FERTILISANTES

Pour les fumiers, il n'existe pas, actuellement, de méthode permettant un dosage rapide de la valeur azotée. L'analyse en laboratoire est la seule possible. L'analyse doit porter sur les critères suivants : % de matière sèche, N total, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O.

La difficulté vient de l'échantillonnage du tas de fumier. Il doit refléter la composition du fumier présent. Si plusieurs types de fumiers sont utilisés, il est préférable de faire une analyse pour chacun d'eux. Le meilleur échantillonnage du fumier est obtenu au moment de l'épandage. Disposer sur le sol une vingtaine de morceaux de bâche plastique. Epandre le fumier sur les bâches (avec un épandeur si c'est l'appareil utilisé), récupérer dans un seau le fumier tombé dessus. Les prélèvements sont mélangés dans le seau avant de constituer un échantillon d'1 kg. Ce dernier est expédié rapidement au laboratoire, ou stocké au froid en attendant son transport. Cette méthode simple peut être utilisée facilement par les agriculteurs.



## 2.5. RÔLE DE LA PHASE AQUEUSE DES SOLS DANS LA FERTILITÉ DES SOLS

### 2.5.1. L'eau disponible pour la plante ou « eau utile »

Les nutriments ne seront récupérés efficacement par les plantes que si les cultures ont **suffisamment d'eau à leur disposition**<sup>30</sup>. Grâce à diverses techniques (ex : aménagement des parcelles pour favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol), il est possible d'augmenter la quantité de précipitations captées et mises à la disposition des cultures dans des zones sujettes à la sécheresse.

L'approche durable vise **plutôt à collecter le plus d'eau possible pour répondre aux besoins que d'apporter de l'eau par irrigation**. On peut collecter de l'eau par exemple en installant des structures permettant de diminuer le ruissellement (ex : le système « zai » utilisé au Sahel ou l'utilisation de bassins d'ensemencement en Afrique australe), de ralentir la vitesse d'écoulement de l'eau sur le sol, ou on peut penser à couvrir la surface du sol avec un paillis organique pour favoriser l'infiltration et réduire l'évaporation à la surface du sol.

### 2.5.2. Le rôle de l'eau dans le transfert des ions entre la phase solide et la phase liquide

L'eau est à la fois **un aliment** (source d'hydrogène et d'oxygène) et **un véhicule** qui permet aux racines d'absorber les éléments fertilisants dissous.

Les **plantes**, pour la plupart, tirent du sol l'eau et les sels minéraux qui leur sont nécessaires. Les racines qui forment l'appareil racinaire et **les poils absorbants** localisés sur les plus jeunes d'entre elles, jouent pour cela **un rôle essentiel**. Les racines absorbent les éléments minéraux **sous forme d'ions**, soit à partir de

30 Pour plus de détails, voir aussi COLEACP, Manuel Gestion durable de l'eau, Chapitre 3.

la solution du sol, qu'ils soient libres ou piégés dans des complexes organiques particuliers (les « chélats »), soit à partir de réseaux colloïdaux du sol (complexe argilo-humique) sur lesquels les éléments sont adsorbés (fixés en surface) comme le montre la figure ci-dessus :

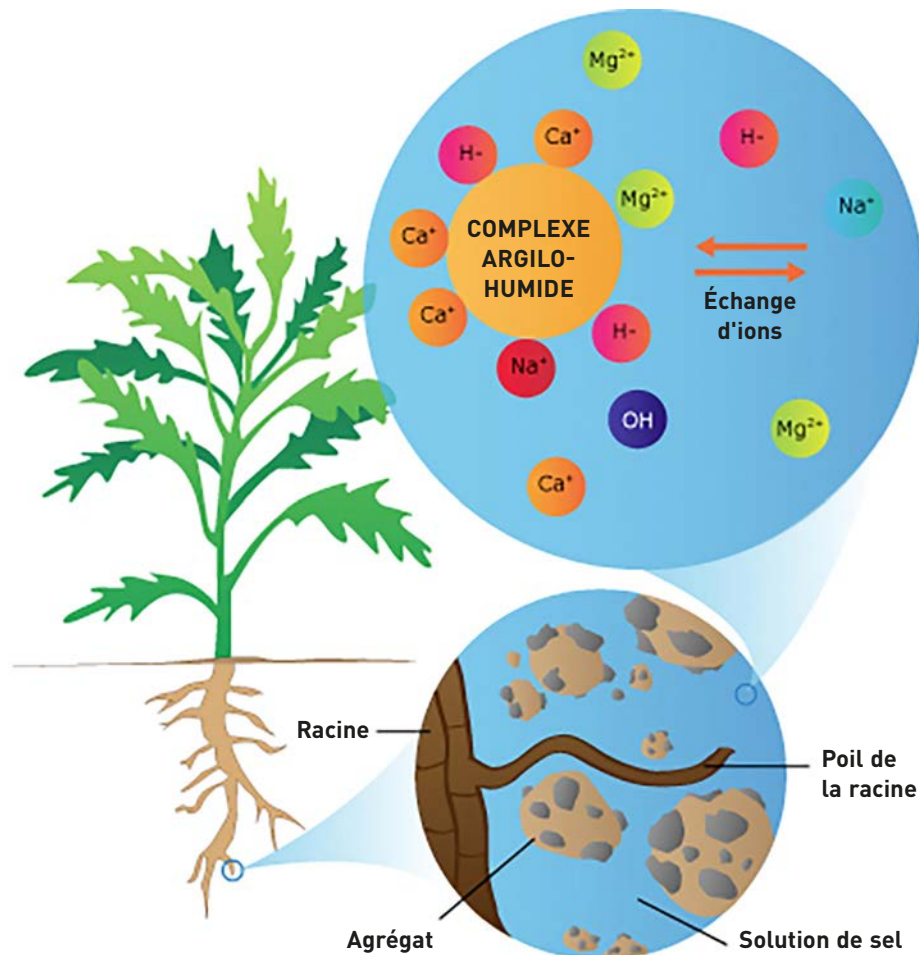


Figure 16 - Absorption des ions par les racines des plantes

Par les poils absorbants de ses racines, la plante absorbe **la solution du sol, c'est-à-dire l'eau et les sels minéraux**, qui constituent la sève brute, ou sève minérale. C'est pourquoi le sol devrait être suffisamment humide pour permettre l'absorption d'engrais minéraux et de composants minéraux produits par les organismes du sol.

Les éléments minéraux adsorbés sur les colloïdes ou dissous dans la solution du sol transitent vers la racine par deux processus :

- **Flux de masse** (mass-flow) : transport par l'eau de transpiration des végétaux. Ce phénomène est susceptible de mettre à la disposition de la plante des quantités d'éléments variables avec la concentration de la solution du sol et sans relation avec les exportations des plantes en chacun des éléments.
- **Osmose** : mouvement d'ions se produisant sous l'effet d'un gradient de concentrations (diffusion). Elle dépend du pouvoir absorbant du sol et de la mobilité des ions. Elle n'intervient que sur de faibles distances.

L'absorption des éléments minéraux par les racines est **un phénomène sélectif** : la plante choisit les éléments les plus utiles à son métabolisme. Elle comporte :

- une phase passive d'échanges des ions sur les surfaces d'échange de la racine : les cations sont échangés contre les  $H^+$  des parois cellulaires porteuses, en raison de leur constitution biochimique, de charges négatives déterminant une capacité d'échange de cations ;
- une phase active de pénétration qui est assurée par l'énergie fournie par la respiration. Le transport de chaque ion se fait par un transporteur spécifique.

Ceci explique pourquoi certaines plantes accumulent préférentiellement certains éléments traces métalliques (ETM) ou le nitrate.



## 2.6. ANNEXES

### 2.6.1. A1 – Apport des principaux engrais chimiques en éléments nutritifs selon les quantités

Ces tableaux vous permettent très facilement de voir quels sont les apports (ou non) de chaque élément selon les quantités apportées (en kg, de 10 kg à 10 tonnes) sur la parcelle. Pour les valeurs intermédiaires il suffit de multiplier les valeurs ou de les sommer.

#### 2.6.1.1. ENGRAIS AZOTES

NITRATE DE SODIUM: $\text{NaNO}_3$							
Quantité (en kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	MgO	CaO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$
10	1,6					3,65	
20	3,2					7,3	
50	8					18,25	
100	16					36,5	
200	32					73	
300	48					109,5	
400	64					146	
500	80					182,5	
600	96					219	
700	112					255,5	
800	128					292	
900	144					328,5	
1 000	160					365	
2 000	320					730	
3 000	480					1 095	
4 000	640					1 460	
5 000	800					1 825	
6 000	960					2 190	
7 000	1 120					2 555	
8 000	1 280					2 920	
9 000	1 440					3 285	
10 000	1 600					3 650	

NITRATE DE CALCIUM ET DE MAGNESIUM :  $\text{CaMg}(\text{NO}_3)_2$ 

Quantité (en kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	1,5			0,8	4,6		
20	3			1,6	9,2		
50	7,5			4	23		
100	15			8	46		
200	30			16	92		
300	45			24	138		
400	60			32	184		
500	75			40	230		
600	90			48	276		
700	105			56	322		
800	120			64	368		
900	135			72	414		
1 000	150			80	460		
2 000	300			160	920		
3 000	450			240	1 380		
4 000	600			320	1 840		
5 000	750			400	2 300		
6 000	900			480	2 760		
7 000	1 050			560	3 220		
8 000	1 200			640	3 680		
9 000	1 350			720	4 140		
10 000	1 500			800	4 600		

NITRATE DE POTASSIUM : KNO <sub>3</sub>							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	1,3		4,6				
20	2,6		9,2				
50	6,5		23				
100	13		46				
200	26		92				
300	39		138				
400	52		184				
500	65		230				
600	78		276				
700	91		322				
800	104		368				
900	117		414				
1 000	130		460				
2 000	260		920				
3 000	390		1 380				
4 000	520		1 840				
5 000	650		2 300				
6 000	780		2 760				
7 000	910		3 220				
8 000	1 040		3 680				
9 000	1 170		4 140				
10 000	1 300		4 600				

AMMONITRATE A 20% D'AZOTE							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	2,7						
20	5,4						
50	13,5						
100	27						
200	54						
300	81						
400	108						
500	135						
600	162						
700	189						
800	216						
900	243						
1 000	270						
2 000	540						
3 000	810						
4 000	1 080						
5 000	1 350						
6 000	1 620						
7 000	1 890						
8 000	2 160						
9 000	2 430						
10 000	2 700						

AMMONITRATE A 33,5% D'AZOTE							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	3,35						
20	6,7						
50	16,75						
100	33,5						
200	67						
300	100,5						
400	134						
500	167,5						
600	201						
700	234,5						
800	268						
900	301,5						
1 000	335						
2 000	670						
3 000	1 005						
4 000	1 340						
5 000	1 675						
6 000	2 010						
7 000	2 345						
8 000	2 680						
9 000	3 015						
10 000	3 350						



SULFATE D'AMMONIAQUE :  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 

Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	2,1						6,1
20	4,2						12,2
50	10,5						30,5
100	21						61
200	42						122
300	63						183
400	84						244
500	105						305
600	126						366
700	147						427
800	168						488
900	189						549
1 000	210						610
2 000	420						1 220
3 000	630						1 830
4 000	840						2 440
5 000	1 050						3 050
6 000	1 260						3 660
7 000	1 470						4 270
8 000	1 680						4 880
9 000	1 890						5 490
10 000	2 100						6 100

AMMONIAC ANHYDRE : NH <sub>3</sub>							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	8,2						
20	16,4						
50	41						
100	82						
200	164						
300	246						
400	328						
500	410						
600	492						
700	574						
800	656						
900	738						
1 000	820						
2 000	1 640						
3 000	2 460						
4 000	3 280						
5 000	4 100						
6 000	4 920						
7 000	5 740						
8 000	6 560						
9 000	7 380						
10 000	8 200						

UREE							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	4,6						
20	9,2						
50	23						
100	46						
200	92						
300	138						
400	184						
500	230						
600	276						
700	322						
800	368						
900	414						
1 000	460						
2 000	920						
3 000	1 380						
4 000	1 840						
5 000	2 300						
6 000	2 760						
7 000	3 220						
8 000	3 680						
9 000	4 140						
10 000	4 600						

DAP ou PHOSPHATE DE DIAMMONIUM							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	1,8	4,6					
20	3,6	9,2					
50	9	23					
100	18	46					
200	36	92					
300	54	138					
400	72	184					
500	90	230					
600	108	276					
700	126	322					
800	144	368					
900	162	414					
1000	180	460					
2000	360	920					
3000	540	1380					
4000	720	1840					
5000	900	2300					
6000	1080	2760					
7000	1260	3220					
8000	1440	3680					
9000	1620	4140					
10000	1800	4600					

## 2.6.1.2. A1.2. ENGRAIS PHOSPHATES

PHOSPHATE NATUREL TENDRE							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10		2,5					3
20		5					6
50		12,5					15
100		25					30
200		50					60
300		75					90
400		100					120
500		125					150
600		150					180
700		175					210
800		200					240
900		225					270
1000		250					300
2000		500					600
3000		750					900
4000		1000					1200
5000		1250					1500
6000		1500					1800
7000		1750					2100
8000		2000					2400
9000		2250					2700
10000		2500					3000



SUPERPHOSPHATE NORMAL							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10		1,6					2,2
20		3,2					4,4
50		8					11
100		16					22
200		32					44
300		48					66
400		64					88
500		80					110
600		96					132
700		112					154
800		128					176
900		144					198
1 000		160					220
2 000		320					440
3 000		480					660
4 000		640					880
5 000		800					1 100
6 000		960					1 320
7 000		1 120					1 540
8 000		1 280					1 760
9 000		1 440					1 980
10 000		1 600					2 200

SUPERPHOSPHATE CONCENTRE							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10		2,5					1,2
20		5					2,4
50		12,5					6
100		25					12
200		50					24
300		75					36
400		100					48
500		125					60
600		150					72
700		175					84
800		200					96
900		225					108
1 000		250					120
2 000		500					240
3 000		750					360
4 000		1 000					480
5 000		1 250					600
6 000		1 500					720
7 000		1 750					840
8 000		2 000					960
9 000		2 250					1 080
10 000		2 500					1 200

SUPERPHOSPHATE TRIPLE							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10		3,8					
20		7,6					
50		19					
100		38					
200		76					
300		114					
400		152					
500		190					
600		228					
700		266					
800		304					
900		342					
1 000		380					
2 000		760					
3 000		1 140					
4 000		1 520					
5 000		1 900					
6 000		2 280					
7 000		2 660					
8 000		3 040					
9 000		3 420					
10 000		3 800					

## 2.6.1.3. A1.3. ENGRAIS POTASSIQUE

CHLORURE DE POTASSIUM : KCl							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10			6				
20			12				
50			30				
100			60				
200			120				
300			180				
400			240				
500			300				
600			360				
700			420				
800			480				
900			540				
1 000			600				
2 000			1 200				
3 000			1 800				
4 000			2 400				
5 000			3 000				
6 000			3 600				
7 000			4 200				
8 000			4 800				
9 000			5 400				
10 000			6 000				

SULFATE DE POTASSIUM : $K_2SO_4$							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	$P_2O_5$	$K_2O$	MgO	CaO	$Na_2O$	$SO_3$
10			5				4,3
20			10				8,6
50			25				21,5
100			50				43
200			100				86
300			150				129
400			200				172
500			250				215
600			300				258
700			350				301
800			400				344
900			450				387
1 000			500				430
2 000			1 000				860
3 000			1 500				1 290
4 000			2 000				1 720
5 000			2 500				2 150
6 000			3 000				2 580
7 000			3 500				3 010
8 000			4 000				3 440
9 000			4 500				3 870
10 000			5 000				4 300



## SULFATE DOUBLE DE POTASSIUM ET DE MAGNESIUM : PATENT KALI

Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10			3	1			5,4
20			6	2			10,8
50			15	5			27
100			30	10			54
200			60	20			108
300			90	30			162
400			120	40			216
500			150	50			270
600			180	60			324
700			210	70			378
800			240	80			432
900			270	90			486
1 000			300	100			540
2 000			600	200			1 080
3 000			900	300			1 620
4 000			1 200	400			2 160
5 000			1 500	500			2 700
6 000			1 800	600			3 240
7 000			2 100	700			3 780
8 000			2 400	800			4 320
9 000			2 700	900			4 860
10 000			3 000	1 000			5 400

## 2.6.1.4. A1.4. ENGRAIS TERNAIRES

NPK 15-15-15							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	1,5	1,5	1,5				
20	3	3	3				
50	7,5	7,5	7,5				
100	15	15	15				
200	30	30	30				
300	45	45	45				
400	60	60	60				
500	75	75	75				
600	90	90	90				
700	105	105	105				
800	120	120	120				
900	135	135	135				
1 000	150	150	150				
2 000	300	300	300				
3 000	450	450	450				
4 000	600	600	600				
5 000	750	750	750				
6 000	900	900	900				
7 000	1 050	1 050	1 050				
8 000	1 200	1 200	1 200				
9 000	1 350	1 350	1 350				
10 000	1 500	1 500	1 500				

NPK 17-17-17							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	1,7	1,7	1,7				
20	3,4	3,4	3,4				
50	8,5	8,5	8,5				
100	17	17	17				
200	34	34	34				
300	51	51	51				
400	68	68	68				
500	85	85	85				
600	102	102	102				
700	119	119	119				
800	136	136	136				
900	153	153	153				
1000	170	170	170				
2000	340	340	340				
3000	510	510	510				
4000	680	680	680				
5000	850	850	850				
6000	1020	1020	1020				
7000	1190	1190	1190				
8000	1360	1360	1360				
9000	1530	1530	1530				
10000	1700	1700	1700				

NPK 6-12-12							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	0,6	1,2	1,2				
20	1,2	2,4	2,4				
50	3	6	6				
100	6	12	12				
200	12	24	24				
300	18	36	36				
400	24	48	48				
500	30	60	60				
600	36	72	72				
700	42	84	84				
800	48	96	96				
900	54	108	108				
1 000	60	120	120				
2 000	120	240	240				
3 000	180	360	360				
4 000	240	480	480				
5 000	300	600	600				
6 000	360	720	720				
7 000	420	840	840				
8 000	480	960	960				
9 000	540	1 080	1 080				
10 000	600	1 200	1 200				

NPK 10-20-20							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	1	2	2				
20	2	4	4				
50	5	10	10				
100	10	20	20				
200	20	40	40				
300	30	60	60				
400	40	80	80				
500	50	100	100				
600	60	120	120				
700	70	140	140				
800	80	160	160				
900	90	180	180				
1 000	100	200	200				
2 000	200	400	400				
3 000	300	600	600				
4 000	400	800	800				
5 000	500	1 000	1 000				
6 000	600	1 200	1 200				
7 000	700	1 400	1 400				
8 000	800	1 600	1 600				
9 000	900	1 800	1 800				
10 000	1 000	2 000	2 000				



NPK 20-10-10							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	2	1	1				
20	4	2	2				
50	10	5	5				
100	20	10	10				
200	40	20	20				
300	60	30	30				
400	80	40	40				
500	100	50	50				
600	120	60	60				
700	140	70	70				
800	160	80	80				
900	180	90	90				
1000	200	100	100				
2000	400	200	200				
3000	600	300	300				
4000	800	400	400				
5000	1000	500	500				
6000	1200	600	600				
7000	1400	700	700				
8000	1600	800	800				
9000	1800	900	900				
10000	2000	1000	1000				

NPK 22-11-11							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	2,2	1,1	1,1				
20	4,4	2,2	2,2				
50	11	5,5	5,5				
100	22	11	11				
200	44	22	22				
300	66	33	33				
400	88	44	44				
500	110	55	55				
600	132	66	66				
700	154	77	77				
800	176	88	88				
900	198	99	99				
1 000	220	110	110				
2 000	440	220	220				
3 000	660	330	330				
4 000	880	440	440				
5 000	1 100	550	550				
6 000	1 320	660	660				
7 000	1 540	770	770				
8 000	1 760	880	880				
9 000	1 980	990	990				
10 000	2 200	1 100	1 100				

NPK 11-22-16							
Quantité (kg)	TENEUR EN ELEMENTS NUTRITIFS (en kg)						
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
10	1,1	2,2	1,6				
20	2,2	4,4	3,2				
50	5,5	11	8				
100	11	22	16				
200	22	44	32				
300	33	66	48				
400	44	88	64				
500	55	110	80				
600	66	132	96				
700	77	154	112				
800	88	176	128				
900	99	198	144				
1 000	110	220	160				
2 000	220	440	320				
3 000	330	660	480				
4 000	440	880	640				
5 000	550	1 100	800				
6 000	660	1 320	960				
7 000	770	1 540	1 120				
8 000	880	1 760	1 280				
9 000	990	1 980	1 440				
10 000	1 100	2 200	1 600				

### 2.6.2. A2 - Apport de quelques engrais organiques en éléments nutritifs selon les quantités

Ces tableaux vous permettent très facilement de voir quels sont les apports (ou non) de chaque élément selon les quantités apportées (en kg, de 10 kg à 10 tonnes) sur la parcelle. Pour les valeurs intermédiaires il suffit de multiplier les valeurs ou de les sommer.

FUMIER DE BOVIN						
Quantité (en kg)	TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX (en kg)					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>
100	0,165	0,18	0,83	0,23	0,25	0,18
200	0,33	0,36	1,66	0,46	0,5	0,36
300	0,495	0,54	2,49	0,69	0,75	0,54
400	0,66	0,72	3,32	0,92	1	0,72
500	0,825	0,9	4,15	1,15	1,25	0,9
600	0,99	1,08	4,98	1,38	1,5	1,08
700	1,155	1,26	5,81	1,61	1,75	1,26
800	1,32	1,44	6,64	1,84	2	1,44
900	1,485	1,62	7,47	2,07	2,25	1,62
1 000	1,65	1,8	8,3	2,3	2,5	1,8
2 000	3,3	3,6	16,6	4,6	5	3,6
3 000	4,95	5,4	24,9	6,9	7,5	5,4
4 000	6,6	7,2	33,2	9,2	10	7,2
5 000	8,25	9	41,5	11,5	12,5	9
6 000	9,9	10,8	49,8	13,8	15	10,8
7 000	11,55	12,6	58,1	16,1	17,5	12,6
8 000	13,2	14,4	66,4	18,4	20	14,4
9 000	14,85	16,2	74,7	20,7	22,5	16,2
10 000	16,5	18	83	23	25	18

FUMIER DE PORC			
Quantité (en kg)	TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX (en kg)		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
100	0,135	0,2	0,6
200	0,27	0,4	1,2
300	0,405	0,6	1,8
400	0,54	0,8	2,4
500	0,675	1	3
600	0,81	1,2	3,6
700	0,945	1,4	4,2
800	1,08	1,6	4,8
900	1,215	1,8	5,4
1 000	1,35	2	6
2 000	2,7	4	12
3 000	4,05	6	18
4 000	5,4	8	24
5 000	6,75	10	30
6 000	8,1	12	36
7 000	9,45	14	42
8 000	10,8	16	48
9 000	12,15	18	54
10 000	13,5	20	60



LISIER DE BOVIN						
Quantité (en kg)	TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX (en kg)					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>
100	0,231	0,187	0,33	0,1	0,2	0,08
200	0,462	0,374	0,66	0,2	0,4	0,16
300	0,693	0,561	0,99	0,3	0,6	0,24
400	0,924	0,748	1,32	0,4	0,8	0,32
500	1,155	0,935	1,65	0,5	1	0,4
600	1,386	1,122	1,98	0,6	1,2	0,48
700	1,617	1,309	2,31	0,7	1,4	0,56
800	1,848	1,496	2,64	0,8	1,6	0,64
900	2,079	1,683	2,97	0,9	1,8	0,72
1000	2,31	1,87	3,3	1	2	0,8
2000	4,62	3,74	6,6	2	4	1,6
3000	6,93	5,61	9,9	3	6	2,4
4000	9,24	7,48	13,2	4	8	3,2
5000	11,55	9,35	16,5	5	10	4
6000	13,86	11,22	19,8	6	12	4,8
7000	16,17	13,09	23,1	7	14	5,6
8000	18,48	14,96	26,4	8	16	6,4
9000	20,79	16,83	29,7	9	18	7,2
10000	23,1	18,7	33	10	20	8

LISIER DE PORC						
Quantité (en kg)	TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX (en kg)					
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>
100	0,34	0,3655	0,45	0,13	0,3	0,07
200	0,68	0,731	0,9	0,26	0,6	0,14
300	1,02	1,0965	1,35	0,39	0,9	0,21
400	1,36	1,462	1,8	0,52	1,2	0,28
500	1,7	1,8275	2,25	0,65	1,5	0,35
600	2,04	2,193	2,7	0,78	1,8	0,42
700	2,38	2,5585	3,15	0,91	2,1	0,49
800	2,72	2,924	3,6	1,04	2,4	0,56
900	3,06	3,2895	4,05	1,17	2,7	0,63
1 000	3,4	3,655	4,5	1,3	3	0,7
2 000	6,8	7,31	9	2,6	6	1,4
3 000	10,2	10,965	13,5	3,9	9	2,1
4 000	13,6	14,62	18	5,2	12	2,8
5 000	17	18,275	22,5	6,5	15	3,5
6 000	20,4	21,93	27	7,8	18	4,2
7 000	23,8	25,585	31,5	9,1	21	4,9
8 000	27,2	29,24	36	10,4	24	5,6
9 000	30,6	32,895	40,5	11,7	27	6,3
10 000	34	36,55	45	13	30	7

COMPOST			
Quantité (en kg)	TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX (en kg)		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
100	0,03	0,18	0,3
200	0,06	0,36	0,6
300	0,09	0,54	0,9
400	0,12	0,72	1,2
500	0,15	0,9	1,5
600	0,18	1,08	1,8
700	0,21	1,26	2,1
800	0,24	1,44	2,4
900	0,27	1,62	2,7
1 000	0,3	1,8	3
2 000	0,6	3,6	6
3 000	0,9	5,4	9
4 000	1,2	7,2	12
5 000	1,5	9	15
6 000	1,8	10,8	18
7 000	2,1	12,6	21
8 000	2,4	14,4	24
9 000	2,7	16,2	27
10 000	3	18	30

LOMBRICOMPOST				
Quantité (en kg)	TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX (en kg)			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO
100	0,3	0,455	1	2,7
200	0,6	0,91	2	5,4
300	0,9	1,365	3	8,1
400	1,2	1,82	4	10,8
500	1,5	2,275	5	13,5
600	1,8	2,73	6	16,2
700	2,1	3,185	7	18,9
800	2,4	3,64	8	21,6
900	2,7	4,095	9	24,3
1 000	3	4,55	10	27
2 000	6	9,1	20	54
3 000	9	13,65	30	81
4 000	12	18,2	40	108
5 000	15	22,75	50	135
6 000	18	27,3	60	162
7 000	21	31,85	70	189
8 000	24	36,4	80	216
9 000	27	40,95	90	243
10 000	30	45,5	100	270

GUANO DE CHAUVE-SOURIS			
Quantité (en kg)	TENEUR EN ÉLÉMENTS MINÉRAUX (en kg)		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
100	2,79	9,3	0,93
200	5,58	18,6	1,86
300	8,37	27,9	2,79
400	11,16	37,2	3,72
500	13,95	46,5	4,65
600	16,74	55,8	5,58
700	19,53	65,1	6,51
800	22,32	74,4	7,44
900	25,11	83,7	8,37
1 000	27,9	93	9,3
2 000	55,8	186	18,6
3 000	83,7	279	27,9
4 000	111,6	372	37,2
5 000	139,5	465	46,5
6 000	167,4	558	55,8
7 000	195,3	651	65,1
8 000	223,2	744	74,4
9 000	251,1	837	83,7
10 000	279	930	93





# Chapitre 3

## Les causes de la dégradation des sols

3.1. La dégradation des sols est due essentiellement à l'homme . . . . .	148
3.2. L'érosion des sols . . . . .	160
3.3. Influence des pratiques culturales sur la fertilité du sol . . . . .	165
3.4. Les conséquences sur les sols de la déforestation . . . . .	170
3.5. Les conséquences du surpâturage . . . . .	174
3.6. La salinisation des sols . . . . .	176
3.7. La compaction du sol . . . . .	182
3.8. La pollution des sols . . . . .	185

## OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES

À l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- De comprendre pourquoi et comment la dégradation des sols est avant tout due aux activités humaines, et quelle est l'ampleur du phénomène.
- De connaître les causes du déclin de la fertilité des sols (modification de leurs propriétés physiques et propriétés chimiques).
- De comprendre l'influence de certaines pratiques culturales, les phénomènes d'érosion, de déforestation, de salinisation, de compaction des sols
- D'identifier la nature et l'origine des divers polluants du sol et le danger qu'ils représentent pour l'homme, la plante et le milieu.

### 3.1. LA DÉGRADATION DES SOLS EST DUE ESSENTIELLEMENT À L'HOMME

#### 3.1.1. Un phénomène à l'échelle mondiale

À travers le monde, les exemples de régions où les sols ont été **gravement altérés suite à leur mauvaise exploitation** sont très nombreux. Le sol peut se dégrader rapidement alors qu'il lui faut environ 20.000 ans pour se former et se régénérer. **Il est donc capital de préserver la qualité agricole et la fertilité des sols.** Les solutions «hors sols» (aquaponie, hydroponie, etc.) ne pourront jamais remplacer complètement la capacité des sols agricoles à produire la quantité de nourriture dont l'homme a besoin, surtout dans un contexte de forte croissance démographique.

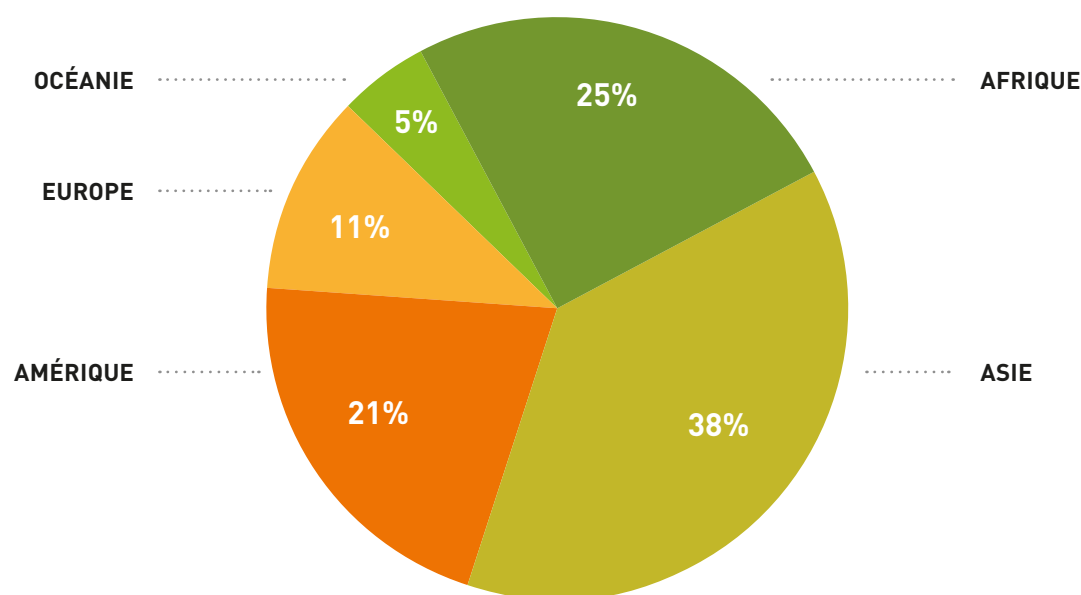


Figure 1 - Taux de dégradation des terres cultivables selon les régions du monde (Source : FAO)

Les superficies de **terres cultivables** sont en **constante diminution**, à un rythme élevé d'environ **5 à 10 millions d'ha par an** (à cause de la dégradation, mais aussi parce que les terres sont utilisées à d'autres fins que l'agriculture malgré leur qualité arable). La dégradation des sols, leur perte de fertilité, est donc **partout dans le monde une préoccupation autant économique qu'écologique**, mais les conséquences en sont ressenties le plus fortement par les populations pauvres des pays en voie de développement. En effet, malheureusement, la dégradation des sols est la plus préoccupante là où la croissance démographique est la plus importante et où l'autosuffisance alimentaire des populations est la plus faible.



Figure 2 - Les conséquences de la dégradation des sols sont ressenties le plus fortement par les populations les plus pauvres de la planète  
(Source : <http://unt.unice.fr/uoh/degsol/>)

Les principales manifestations de cette dégradation du sol se rapportent à deux cas de figure :

- Celles qui concernent actuellement **tous les sols** directement utilisés par l'homme : il s'agit, d'une part, de **l'appauvrissement biologique** (perte de biodiversité) et de **la diminution des taux de matière organique** (perte de résilience), et d'autre part, de **la compaction des sols**.
- Celles **plus localisées** qui ne concernent, pour l'instant, que **des surfaces relativement limitées** de l'ensemble des surfaces cultivables de la planète : **hydromorphie** (excès d'eau), **salinisation** et alcalinisation, **acidification**, appauvrissement en particules fines et en éléments nutritifs, **érosion**, **pollution** (avec ses conséquences sur la qualité des eaux et des produits agricoles). Malheureusement, ces surfaces ont tendance à s'accroître, parfois rapidement.

La dégradation du sol peut se produire à diverses profondeurs, et pas seulement dans les premiers centimètres de la couche superficielle (ex: dans le cas du tassement ou de la salinisation), même si cette dernière est généralement la première et la plus atteinte.

On ajoutera aussi la disparition des surfaces de sol pour des besoins urbains, industriels, miniers, dont nous ne parlerons pas ici mais qui font régresser, parfois dangereusement, les surfaces agricoles utiles. À l'heure actuelle, les **concurrences entre les différents usages de la terre** (terres agricoles contre terrains industriels; construction d'habitations, de routes, de voies de chemin de fer, de magasins avec leurs immenses parkings; mais aussi concurrence entre cultures de rente et cultures vivrières; cultures d'exportation et cultures pour le marché local; etc.). La question foncière fait l'objet de débats animés, aussi bien dans les pays du Nord que dans les pays du Sud.

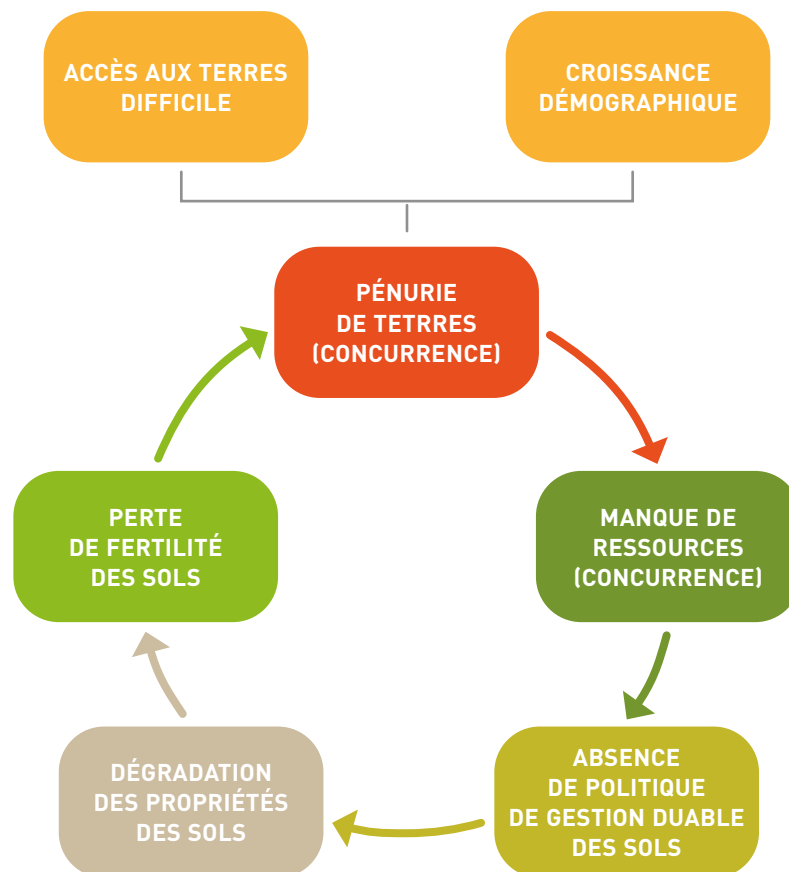


Figure 3 - Le cercle vicieux engendré par une absence de gestion durable des sols



### 3.1.2. De la nécessité d'une politique de préservation des sols en agriculture

Le sol constitue l'un des patrimoines les plus précieux de l'humanité : nous en dépendons entièrement pour notre habitat et notre nutrition. Seul un tiers des surfaces émergées sont destinées à un usage agricole (pastoralisme, cultures, forêt et aquaculture)<sup>31</sup>. **Le sol est un facteur limitant de l'offre alimentaire tant en quantité qu'en qualité.**

Selon l'Organisation des Nations Unies, le taux actuel de dégradation des sols menace à terme notre capacité à répondre aux besoins des générations futures. Ce sont, en effet, près de 9 milliards d'individus que l'agriculture mondiale devra nourrir à l'horizon 2050, soit un accroissement de 70% de la demande en produits agricoles. Dans les pays du Sud, **plusieurs défis s'additionnent** qui compliquent le souhait d'une gestion durable des sols : la croissance démographique, l'intensification des cultures qui entraîne une dégradation excessive (et souvent rapide) des sols, l'absence de véritables politiques locales de gestion des sols, la diminution des terres cultivables et la demande croissante en eau douce, la concurrence pour les ressources due à l'expansion des secteurs urbains et industriels, la gestion du foncier en général. Tous ces facteurs sont non seulement très compliqués mais aussi très délicats à gérer à cause des problèmes de sécurité alimentaire (répondre à l'urgence) et de la pauvreté (manque de ressources). Le défi de la recherche et de la vulgarisation dans ces pays est d'augmenter la productivité agricole par **l'amélioration et le maintien à long terme du potentiel productif** des ressources naturelles disponibles (**notamment le sol**, la végétation et l'eau). Peu nombreux sont les pays qui disposent de ressources financières suffisantes pour **promouvoir une gestion durable des sols**.

Alors que d'autres ressources vitales comme l'eau et l'air sont constamment recyclées et régénérées, **la formation des sols peut prendre des décennies, voire des siècles**. De plus, la fertilité des sols est intimement liée à l'étendue des formes de vie qu'ils abritent (cf. chapitre 1) qui dépendent elles-mêmes de la teneur en matière organique et de sa qualité. Or, dans la majeure partie de l'Afrique subsaharienne, pour des sols qui ont déjà une fertilité fondamentalement faible, ni **la matière organique**, ni **les éléments nutritifs exportés ne sont remplacés de manière adéquate**. L'Afrique subsaharienne a la plus basse consommation d'engrais minéraux, environ 10 kg d'éléments nutritifs (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) par hectare et par an, par rapport à une moyenne de 90 kg au niveau mondial, 60 kg au Proche Orient et 130 kg en Asie (cf. chapitre 3).

31 4,9 milliards d'hectares de terres agricoles sur 13 milliards de surfaces émergées, dont seulement 1,5 milliards de cultures consacrés aux cultures annuelles et permanentes.



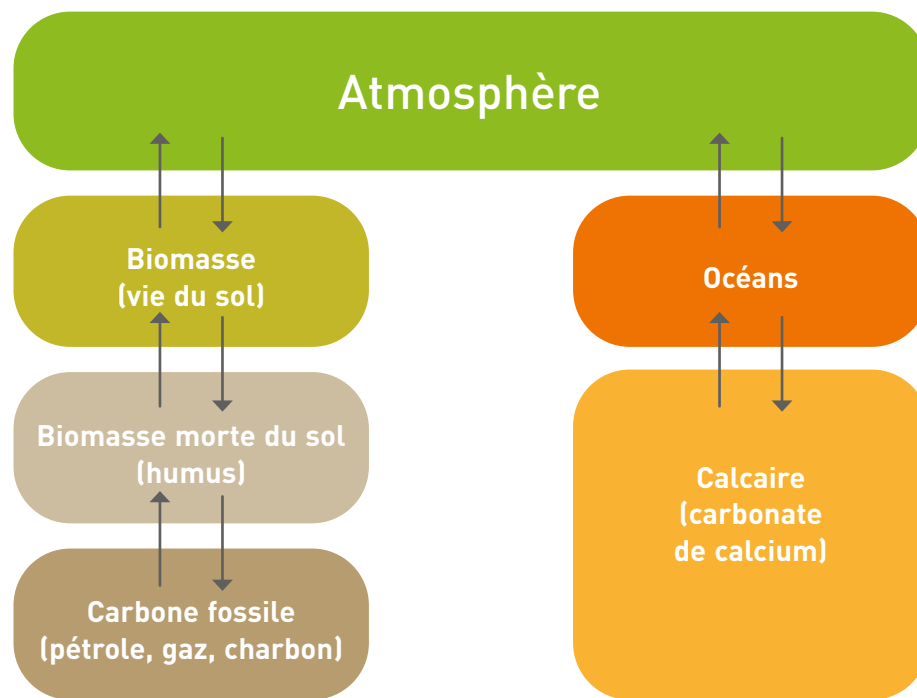


Figure 4 - Cycle normal de piégeage du carbone : importance des sols.  
Au départ de l'atmosphère les flux de carbone sont rapides ; ensuite, ils sont de plus en plus lents.

Pourtant, en plus d'être à la base de la sécurité alimentaire des populations, dans le cadre de la problématique du réchauffement climatique et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, les terres agricoles représentent un **fort potentiel de piégeage du carbone** (Figure 4). Dans ce contexte, sauvegarder les terres agricoles et conserver des sols fertiles, bien vivants, deviennent **des enjeux planétaires incontournables** et d'intérêt public.

### 3.1.3. Les causes du déclin de la fertilité des sols

Le déclin de fertilité du sol (également décrit en tant que déclin de productivité du sol) peut être défini comme une **détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol**. Selon une étude menée en 1991<sup>32</sup>, la dégradation physique des sols est la plus importante et elle est pour une bonne part directement liée à **l'action de l'homme**.

La dégradation de la fertilité du sol peut avoir **de nombreuses causes**. Nous tenterons de décrire plus loin ce que l'on peut considérer comme les principales raisons qui conduisent à une perte de la fertilité, mais il faut considérer que :

- le plus souvent, **les phénomènes mis en cause se combinent et aggravent mutuellement leurs effets** ;
- localement, il peut exister **encore d'autres causes particulières** (que nous n'allons pas aborder ici en détails) tenant aux propriétés du sol, à la gestion du foncier, aux pratiques culturales ou à la gestion des troupeaux, au climat local, etc.

32 Projet Glassod, ISRIC, 1991

Alors que les agriculteurs devraient gérer en « bons pères de famille » les sols (comme d'ailleurs l'ensemble de leurs ressources), force est de constater que sous la pression économique ils adoptent souvent un ensemble de pratiques qui portent atteinte à la fertilité de leurs sols. Comme souvent la dégradation de la fertilité est un **phénomène progressif**, ses effets sur la production ne se font pas sentir immédiatement mais vont en s'amplifiant, conduisant l'agriculteur dans une impasse. Revenir à une situation favorable est alors le plus souvent compliqué et nécessite, non seulement une remise en question de pratiques devenues habituelles, mais aussi de lourds investissements en temps, en main d'œuvre et autres (ex: achat d'engrais et/ou de fertilisants organiques; travail du sol; mise en jachère pour des périodes prolongées; etc.). Plus que jamais, en ce qui concerne les sols, « **prévenir vaut mieux que guérir** » car souvent il est trop tard pour agir et rétablir une fertilité suffisante.

Certaines pratiques culturales ont un effet néfaste sur la qualité des sols. D'autres, au contraire, sont favorables pour le maintien de la fertilité.

### La détérioration des propriétés physiques des sols

Le résultat se traduit par une **dégradation de la structure du sol**, ce qui le rend fragile, et la perte d'autres qualités physiques du sol (ex: porosité). Cette détérioration s'explique par plusieurs causes, liées les unes aux autres, dont :

1. **L'érosion du sol** (d'origine anthropique, hydrique ou éolienne selon les régions, voire une combinaison de ces phénomènes), elle-même générée ou amplifiée par la déforestation. L'érosion du sol est un phénomène naturel, inévitable (sauf en forêt)...mais gérable. Elle correspond à un mouvement des sédiments et matières organiques d'un endroit à un autre. Elle emporte la couche arable du sol, plus propice au soutien de la vie microbienne et végétale. Les matériaux emportés (par l'eau, qui ruisselle sur le sol, ou par le vent, qui arrache des poussières en surface) peuvent se redéposer plus loin sans grandes conséquences pour l'environnement ou participer à la pollution diffuse des sols et des eaux de surface (ex: contamination des cours d'eau par les pesticides fixés sur les particules de sol). Au-delà du climat et de la topographie, **la nature du sol, ses propriétés et son affectation** sont les trois facteurs qui **influencent le plus fortement l'intensité** des phénomènes érosifs.



Figure 5 - Dégradation physique du sol: le phénomène d'érosion

2. **L'absence de couverture du sol**: l'érosion est facilitée par des pratiques culturales inadaptées qui **laissent les sols à nu trop longtemps** comme: le labour, le désherbage ou le surpâturage, **les périodes de discontinuité dans l'occupation du sol** (ce qui entraîne l'absence de végétation au sol durant les intercultures), le travail du sol sur les versants en pente forte, la déforestation, le défrichement de terres marginales ou encore le brûlis. **Les sols sont alors déstructurés et dégradés** par l'action des sécheresses et/ou l'impact des pluies qui les lessivent au lieu de les pénétrer. La perte de structure favorise la formation d'une « croûte de battance » difficile à traverser par l'eau, l'air ou les jeunes plantules qui viennent de germer., accentuent les effets destructifs de l'érosion hydrique. Nous nous attarderons sur **la déforestation** (et son contraire, l'agroforesterie) car il s'agit d'un phénomène observé à l'échelle mondiale. Les raisons de la déforestation sont multiples :

- L'extension des cultures industrielles (par exemple: plantation sur de grandes zones après défrichage pour la production d'avocats au Mexique, ou de soja au Brésil, ou de sésame à la place de la mangue en Afrique de l'Ouest, etc.).
- Le brûlis forestier « traditionnel » pour défricher les parcelles avant semis.
- Les feux de brousse divers (dont ceux causés par la foudre).
- Les feux de renouvellement de pâturage non contrôlés.
- L'exploitation illicite de bois (charbon de bois, bois d'œuvre,...).
- Le prélèvement de bois de chauffe.

3. **La perte de matière organique dans le sol** : le remplacement de la végétation primitive diversifiée (dite climacique) par une végétation secondaire (une monoculture dans le pire des cas) modifie la formation de l'humus et en conséquence influence négativement l'évolution des propriétés du sol. Il est démontré que la disparition d'un couvert végétal varié, en particulier des arbres, contribue à **former moins de matière organique**. Elle est aussi de moindre qualité, plus sensible une minéralisation rapide (les résidus de culture sont beaucoup plus rapidement dégradés par les microorganismes du sol) et donc à une raréfaction progressive. Plus un sol perd sa matière organique, plus son activité biologique décline, plus la battance, la compaction et l'érosion s'installent, entraînant de graves conséquences sur la qualité de l'eau et la production de gaz à effet de serre (l'appauvrissement en matière organique des sols, dû à la suppression de leur couverture végétale naturelle libère dans l'atmosphère des volumes importants de CO<sub>2</sub>, contribuant à l'effet de serre<sup>33</sup>). Les raisons de la perte de matière organique sont multiples :
- L'absence de couverture végétale et de restitution des résidus des cultures constituant la nourriture pour l'activité biologique des sols,
  - La disparition de l'activité biologique, principalement détruite par l'action des outils de travail du sol, impliquant l'incapacité de renouvellement de la matière organique,
  - L'enfouissement des résidus végétaux par le labour profond qui bouleverse les habitats et inverse les conditions de vie de l'activité biologique responsables de leurs dégradation,
  - La minéralisation trop rapide favorisée par le travail intensif du sol qui engendre une forte aération du sol qui catalyse l'activité des bactéries responsables de la minéralisation,
  - L'érosion car la matière organique est stockée sur les premiers centimètres du sol (les plus sensibles).
4. **La compaction du sol** : le phénomène dit de compactage conduit à l'apparition de zones de lissage dans le profil du sol (ex: la «semelle de labour»), coupe les réseaux et galeries ralentissant de ce fait l'infiltration de l'eau en profondeur. Le tassement du sol peut être aussi bien dû au piétinement des animaux qu'au passage répété d'engins agricoles lourds qui conduisent à une **diminution de la porosité du sol**.

33

La quantité de carbone stockée dans les sols, sous forme de matières organiques, est, en moyenne au niveau mondial, deux à trois fois plus grande que celle stockée dans la végétation, naturelle et cultivée ; en milieu équatorial, il y a autant de carbone dans le sol que dans la forêt qui le surmonte ; dans les milieux couverts de prairies et de cultures, il y a dix fois plus de carbone dans les sols que dans la végétation. Lors des opérations de mise en valeur des sols par l'homme, une grande partie de cette matière organique (jusqu'à 80%) est très rapidement, en quelques années, détruite, le CO<sub>2</sub> étant libéré dans l'atmosphère.

### La détérioration des propriétés chimiques des sols

La **dégradation chimique des sols** se traduit notamment par leur salinisation, leur acidification, l'épuisement de leurs éléments nutritifs, leur pollution par des déchets industriels ou par l'application (souvent excessive ou irrationnelle) des pesticides ou des engrais. Elle rend les sols soit impropres à la culture, soit toxiques (pour les microorganismes, les animaux du sol, les plantes et même pour les consommateurs du fait de teneurs excessives de certains éléments à la récolte. Dans la salinisation du sol ou la pollution du sol par des produits chimiques, la productivité du sol peut diminuer sans perte du couvert pédologique par l'altération des propriétés chimiques (et partiellement physiques) du sol in-situ.

La détérioration des propriétés chimiques des sols peut s'expliquer par plusieurs phénomènes sur lesquels nous reviendrons plus en détails :

1. **La salinisation des sols** : elle résulte de l'accumulation de sels hydrosolubles dans le sol tels que le potassium ( $K^+$ ), le magnésium ( $Mg^{++}$ ), le calcium ( $Ca^{++}$ ), le chlorure ( $Cl^-$ ), le sulfate ( $SO_4^{--}$ ), le carbonate ( $HCO_3^{-}$ ), le bicarbonate ( $HCO_3^{-}$ ), et le sodium ( $Na^+$ ). Cette accumulation de sels est le fait de processus naturels du fait d'une teneur élevée en sel du matériau parent, ou de la nappe phéatique sous-jacente qui monte et descend selon les saisons, ou de l'intervention humaine par une pratique d'irrigation inappropriée (usage d'eau d'irrigation riche en sels avec un drainage insuffisant).
2. **La réduction de la teneur et/ou de la disponibilité des principaux éléments nutritifs** (N,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ) et des oligo-éléments. La perte en éléments a été estimée en moyenne à 24 kg d'éléments nutritifs par hectare et par an (10 kg de N ; 4 kg de  $P_2O_5$  et 10 kg de  $K_2O$ ) en 1990 et 48 kg par hectare et par an en 2000, c'est-à-dire une perte équivalente à 100 kg d'engrais par hectare et par an. Les pays ayant les taux de perte les plus élevés (Tableau 1), tels le Kenya et l'Ethiopie, ont également une importante érosion du sol. En Afrique subsaharienne, les sols ont été cultivés plus intensivement sans restauration de la fertilité (ceci étant dû à l'utilisation limitée des engrais et à d'autres procédés de gestion des sols), et une grande partie des nouvelles terres mises en culture est de plus mauvaise qualité que la terre cultivée précédemment.

**Tableau 1** - Pays de l'Afrique subsaharienne classés par taux de perte d'éléments nutritifs (Source : FAO, d'après Stoorvogel et Smaling, 1990).

Basse	Modérée	Forte	Très forte
Angola	Bénin	Côte d'Ivoire	Burundi
Botswana	Burkina Faso	Ghana	Ethiopie
Congo	Cameroun	Madagascar	Kenya
Guinée	Gabon	Mozambique	Lesotho
Ile Maurice	Gambie	Nigéria	Malawi
Mali	Libéria	Ouganda	Rwanda
Mauritanie	Niger	Somalie	
Rép. Centrafricaine	Sénégal	Swaziland	
Tchad	Sierra Leone	Tanzanie	
Zambie	Soudan	Zimbabwe	
	Togo		
	Zaire		

- L'acidification** : l'acidification des sols est un **phénomène naturel** engendré par la pluie et par certains processus biologiques (respiration, oxydation de l'azote et du soufre organiques...). Mais en générant des exportations les pratiques agricoles peuvent accélérer le processus (cultures de légumineuses, enlèvement des résidus de récolte,...). Elle peut être induite ou exacerbée par **l'usage intensif des engrais chimiques** (apports d'engrais azotés ammoniacaux) ou par les changements climatiques, mais aussi par **l'irrigation** (lessivage des nitrates) et le **drainage**. Elle conduit à plus ou moins long terme (selon le pouvoir tampon de pH des sols) à une baisse du pH. Le  $pH_{\text{eau}}$  peut ainsi être abaissé jusqu'à des valeurs pour lesquelles l'aluminium devient toxique ( $pH_{\text{eau}}$  inférieur à 5,5) et peut pénaliser fortement la production des cultures. La mesure du  $pH_{\text{eau}}$  est incontournable pour caractériser l'acidité d'un sol. La mesure du  $pH_{\text{eau}}$  doit être réalisée tous les 5 ans à la même période. Pour la grande majorité des cultures (céréales, maïs, légumes...), le maintien du  $pH_{\text{eau}}$  dans la gamme 6-6,5 permet de s'affranchir de tout problème lié à l'excès d'acidité. Lorsque le  $pH_{\text{eau}}$  est supérieur à 6,5 les risques de carences (manganèse ou bore) et de maladies (ex : gale de la pomme de terre) augmentent sensiblement
- La pollution par des métaux lourds ou des matières toxiques** (biocides, pesticides ou autres polluants comme les hydrocarbures). Les métaux lourds (ou plus généralement les éléments-trace métalliques), tels que le plomb, le cadmium, le zinc, le cuivre, etc. s'accumulent progressivement dans les sols via des apports exogènes (fumiers, lisiers, composts d'ordures ménagères, engrais chimiques,...) et peuvent soit tuer, soit nuire au développement des organismes (vers de terre, insectes, nématodes) ou des microorganismes (bactéries, champignons) essentiels pour l'humification, comme pour entretenir la cohésion et la capillarité du sol. Les pesticides et autres biocides, ou les hydrocarbures, peuvent aussi se trouver en concentrations telles dans le sol (même momentanément) qu'ils détruisent la vie du sol, déséquilibrent les grands cycles de minéralisation, ou même créent un vide biologique. L'équilibre chimique entre les éléments nutritifs est rompu, le pH se modifie, amplifiant le phénomène, tandis que peu à peu la structure du sol change en même temps.



### 5. Impacts de l'usage des intrants chimiques

La pollution par les polluants organiques rejetés dans l'atmosphère qui retombent sur les sols est un gros problème car **les sols gardent en «mémoire» les produits chimiques**: spécialement les dioxines et les PCB (polychlorobiphényles), qui sont des polluants particulièrement persistants dans les sols, ou les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), ou encore les métaux lourds comme le Plomb (Pb), le Cadmium (Cd), le Cuivre (Cu) et le Zinc (Zn). Les pollutions industrielles sont très importantes **autour des centres urbains**, où les industries et la forte utilisation de carburant plombé ont contaminé le sol en plomb. Des sols pollués peuvent devenir impropres à la culture, notamment dans les bas-fonds (comme à Yaoundé au Cameroun) ou en périphérie des sites miniers (comme à Lubumbashi en RDC). Mais les pratiques agricoles intensives peuvent aussi «marquer» durablement les sols. Ainsi, on observe une différence entre les sols cultivés en agriculture biologique et ceux où des engrais minéraux, des insecticides, des fongicides et des herbicides ont été utilisés pendant des années : la biodiversité diminue, l'activité biologique se réduit, la structure se fragilise.

- ***La pollution du sol par les pesticides***

En Afrique, les maraîchers cherchent la nécessité d'améliorer la productivité des surfaces agricoles de façon à pouvoir maintenir et même améliorer leurs revenus. Ceci a conduit à une évolution des pratiques agricoles qui, dorénavant, intègrent l'utilisation des intrants chimiques et en particulier des pesticides (Amadou, 2013).

Chaque personne manipulant des pesticides est responsable des conséquences de leur utilisation pour l'environnement. Chaque fois qu'un produit phytosanitaire est utilisé, il y a un risque soit par accident, soit par négligence ou par manque de connaissances, qu'une partie du produit contamine une zone en dehors de surface traitée. Les zones particulièrement exposées sont :

- les puits, les marigots et les cours d'eau (Figure 6) ;
- les surfaces cultivées où les cultures existantes ou suivantes risquent d'être contaminées ;
- les terres non cultivées abritant une faune et une flore sauvage.

Depuis de nombreuses années, les produits phytosanitaires utilisés en agriculture sont responsables de la dégradation de l'environnement, particulièrement sensibles dans les régions d'agriculture intensive.



Figure 6 – Emballages de pesticides vides, abandonnés au sol ou même jetés dans les puits (Burkina Faso, photo. D. Son).

- **La pollution du sol par les engrais et les amendements**

La dissolution des engrais minéraux dans le sol a plusieurs effets sur les propriétés du sol, parmi lesquels **la salinité et le pH (l'acidification) du sol sont les plus apparents**. Ces effets varient avec les engrais. Durant l'année, plus de 160 millions de tonnes d'engrais minéraux sont répandus à la surface de notre planète. En six décennies, le recours à ces substances aurait été multiplié par cinq et aurait permis de décupler la productivité des cultures. Mais de grandes quantités de ces engrais se répandent dans l'environnement et constituent l'un des principaux facteurs de pollution agricole (Hateb, 2012). Du fait que les terres agricoles cultivées intensivement soient naturellement pauvres en éléments minéraux comme l'azote, le potassium et le phosphore, a poussé, pendant des années, les agriculteurs à utiliser des apports chimiques pour ces éléments. C'est pourquoi, dans certaines régions, on peut observer des taux trop élevés de phosphore dans les sols. Certains engrais phosphatés contiennent des polluants tels que le Cadmium (Cd). Les fertilisants organiques (lisiers, fumiers de porcs) contiennent des concentrations élevées en Cuivre (Cu) et en Zinc (Zn). Cadmium, cuivre, zinc et plomb se trouvent régulièrement dans les engrais et amendements organiques.

#### **La détérioration des propriétés biologiques des sols**

**La dégradation biologique** s'explique par les pratiques culturales (ex: le labour mécanique qui enfouit la couche superficielle en profondeur), l'apport des produits chimiques (engrais, pesticides), la diminution de la teneur en matière organique du sol, l'acidification (pH trop bas), la combustion de la biomasse et l'épuisement de la couverture de végétation. Le climat joue un rôle certain (température et régime des pluies). La dégradation se manifeste par une perte de biomasse (ex: réduction du nombre et de l'activité des bactéries dans le sol) et de biodiversité de la (micro)flore et de la (micro)faune du sol. Les grands cycles (carbone, azote, phosphore,...) sont perturbés, parfois durablement. Enfin, à cause de la perturbation de l'humification, la formation des agrégats (complexe argilo-humique) est également affectée. Le sol perd alors beaucoup de sa qualité et de sa fertilité.

## 3.2. L'ÉROSION DES SOLS<sup>34</sup>

L'érosion est originaire du mot latin «erodere» qui signifie «ronger». C'est le décapage - processus au cours duquel des particules de sol sont détachées -, le transport et le dépôt des éléments solubles et solides du sol sous l'effet de l'eau (érosion hydrique) ou du vent (érosion éolienne). Elle peut être d'origine naturelle ou humaine (érosion anthropique engendrée par le travail du sol).

L'érosion est un phénomène naturel qui peut avoir des effets bénéfiques - comme le dépôt d'alluvions fertiles - et des effets nuisibles. Il n'est donc pas forcément souhaitable d'arrêter toute érosion, mais de la réduire à un niveau acceptable, tolérable. Elle a souvent été présentée comme un danger majeur pour les sols, soit qu'elle appauvrisse sélectivement l'horizon superficiel de sa substance vitale (matières organiques vivantes ou mortes, argiles, limons et nutriments), soit qu'elle décape les horizons superficiels parfois jusqu'à la roche. Mais l'érosion est aussi à l'origine du rajeunissement des sols de montagne et de la formation des plaines les plus fertiles. L'érosion ne devient un problème lorsque la perte de sol affecte considérablement la productivité. C'est malheureusement le cas dans une grande partie de l'Afrique sub-saharienne.

### 3.2.1. L'érosion hydrique

L'érosion hydrique est un phénomène complexe, qui menace particulièrement les potentialités en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents vers un lieu de dépôt.

Les **trois étapes** par lesquelles passe l'érosion sont le **détachement**, le **transport** et la **sédimentation**. Cependant, il est à signaler que la pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées comme schématisé dans la figure suivante :

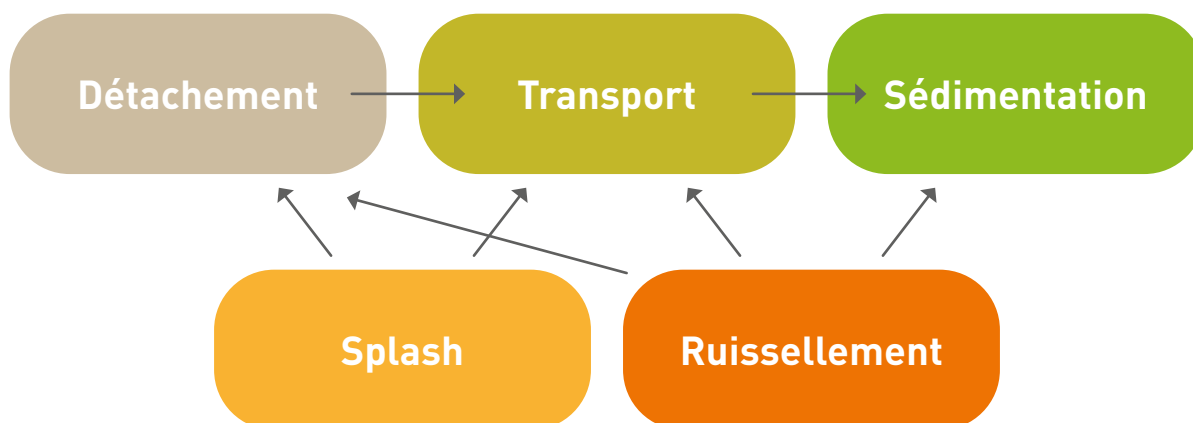


Figure 7 - Représentation schématisée des étapes de l'érosion hydrique

34 Voir aussi COLEACP, Manuel «Produire de façon durable et responsable», Chapitre 2.

### Etape 1 : le détachement des particules

L'humectation par les gouttes de pluies est suivie de quatre principaux mécanismes qui sont responsables d'une désagrégation et qui conduisent au détachement :

- **L'éclatement**, correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation. L'intensité de l'éclatement dépend entre autres, du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité,
- **Le gonflement différentiel**: ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats. L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols.
- **La dispersion physico-chimique**: elle correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation. Elle dépend de la taille et la valence des cations (particulièrement du sodium) pouvant lier les charges négatives dans le sol.
- **La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie** (ou détachement par splash). L'impact des gouttes de pluie peut **fragmenter les agrégats** et surtout détacher les particules de leur surface. La taille et l'impact des gouttes sont des facteurs importants dans ce processus de destruction et d'arrachement. Ce mécanisme intervient en général conjointement aux autres mécanismes cités précédemment et nécessite une pluie d'une **certaine énergie** qui est variable selon les sols. L'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée, mais elle est transformée en force de cisaillement qui provoque détachement et splash. L'énergie cinétique des gouttes qui tombent est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. **Cette énergie cinétique peut être en Afrique deux à six fois plus importante que dans les zones tempérées.** Cela explique l'importance du couvert végétal au sol qui va agir en « amortissant » le choc des gouttes de pluie (absorption d'une bonne partie de l'énergie ; pour réduire l'érosion de 50%, il suffit d'une couverture de 30% de litière ou de 60% de canopée haute de 50 cm).

Cette action combinée de détachement et déplacement par splash des gouttes d'eau est probablement la raison pour laquelle on l'a souvent considéré comme le seul processus à l'origine de la battance et de l'érosion. Cependant, il ne faut pas forcément assimiler splash et dégradation structurale ; le splash peut dans certains cas déplacer des agrégats sans qu'aucune désagrégation n'intervienne. L'énergie d'une seule goutte de pluie arrivant au contact du sol cause une érosion par éclaboussement ou rejaillissement qui peut déplacer sur quelques dizaines de cm les particules détachées (micro-agrégats ou particules élémentaires < 100 µm). La masse de sol détachée peut être de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes par hectare et par an.



Figure 8 - Effet splash des gouttes de pluie sur un sol.

### Etape 2 : le transport des particules

Le transport est assuré par les eaux de pluie, même sur une très faible pente. Il est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie (par rejaillissement ou effet splash) et au ruissellement à la surface du sol. Cependant, il est à signaler que le mode de transport par effet splash est généralement négligeable, sauf sur pente forte. Alors que **les eaux de ruissellement sont les plus responsables** du transport des particules du sol détachées. Pour limiter le transport, il faut donc limiter le ruissellement (le ralentir) par exemple en installant des bandes enherbées.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement « hortonien »), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation). Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux.

Au fur et à mesure que l'écoulement s'accroît, sa vitesse et son volume augmentent ainsi que sa capacité de créer de l'érosion. La vitesse critique de l'écoulement à laquelle commence l'entraînement de particules désagrégées est de 5 m/s sur les sols sablonneux et de 8 m/s sur les sols argileux. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace pouvant donner naissance soit une érosion diffuse et /ou soit une érosion concentrée. À l'échelle du paysage, l'érosion hydrique se traduit par la formation de rigoles ou de ravines.

### Etape 3 : la sédimentation (ou dépôt des particules)

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction :

- de leur dimension ;
- de leur densité ;



- des obstacles au sol (la végétation qui ralentit le ruissellement et qui agit comme une barrière filtrante, retenant les particules);
- de la capacité de transport du ruissellement.

Les particules se déposent dans l'ordre suivant: sable → sable fin → limon. Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où ils se déposent soit après évaporation de l'eau, soit après floculation.

### 3.2.2. L'érosion éolienne

Le phénomène d'érosion éolienne peut se produire n'importe où dès lors que les conditions de sol, de climat et de végétation leur offrent un terrain favorable, c'est-à-dire :

- que le sol est meuble, sec, et assez finement émiété;
- que la surface du sol est relativement égale et la couverture végétale absente ou clairsemée;
- que le champ est suffisamment étendu;
- que le vent est suffisamment fort pour amorcer un mouvement des particules. L'effet du vent sur la surface dépend des caractéristiques et de l'état du sol dans la couche superficielle. La vitesse éolienne requise donc, pour engendrer le mouvement des particules les plus sensibles est fonction de la taille et de la densité des particules détachables. Ainsi, la vitesse du vent devrait être de 15 km/h à la hauteur de 30cm au-dessus du sol pour pouvoir déloger des particules du sol d'environ 0,1mm de diamètre. Sur une surface égale, ces particules émergent à une hauteur suffisante pour absorber une force assez appréciable, mais leur légèreté permet au vent de les déplacer plus facilement.

La vitesse et l'ampleur de l'érosion causée par le vent dépendent des **facteurs suivants** :

#### 3.2.2.1. L'érodabilité du sol

Le vent peut soulever haut dans les airs les particules de sol très fines et les transporter sur de grandes distances (suspension). Il peut soulever les particules de moyennes à fines sur de courtes distances et provoquer leur déplacement par petits bonds successifs qui endommagent les cultures et délogent davantage de sol (saltation). Si les particules de sol sont trop grosses pour que le vent les soulève, celui-ci les déloge et les fait rouler à la surface du sol (roulement). L'abrasion engendrée par le mouvement des particules soufflées par le vent amène une dégradation des agrégats stables à la surface du sol, ce qui accroît encore davantage l'érodabilité du sol.

Les **zones tropicales semi-arides sont particulièrement sensibles**. Pendant la saison sèche, l'effet de surpâturage induit **la disparition d'une grande proportion de la couverture végétale**, laissant des surfaces importantes **non protégées** et dont **la structure se détériore**. Comme c'est le cas pour l'érosion hydrique, la couche la plus riche en éléments nutritifs est érodée, ce qui provoque une diminution de la fertilité du sol.



Au Sahel, durant l'établissement des cultures, des vents violents accompagnant les orages et précédant la pluie provoquent des flux de sable importants sur sol sec. Au cours de ce phénomène, les jeunes plantes sont attaquées ou recouvertes par les particules de sable, ce qui entraîne des pertes importantes pour les cultures.

### 3.2.2.2. *La rugosité de la surface du sol*

Sur les crêtes des sillons des sols qui sont travaillés, **les particules peuvent s'assécher plus rapidement** qu'ailleurs lorsque le vent se lève, ce qui fait que davantage de sol meuble et sec peut être emporté par le vent. Avec le temps, les creux peuvent se combler, de sorte que les sols rugueux peuvent s'aplanir par abrasion. Il en résulte une surface plus lisse vulnérable à l'érosion éolienne. **Un travail excessif du sol peut contribuer à briser la structure du sol et intensifier ainsi l'érosion.**

### 3.2.2.3. *Le climat*

La vitesse du vent et la durée de l'épisode venteux ont un effet direct sur l'ampleur de l'érosion du sol. Les taux d'humidité sont très faibles à la surface des sols excessivement drainés ou durant des périodes de sécheresse, ce qui amène des particules à se détacher et à être emportées par le vent. On constate en Afrique que **l'érosion éolienne se manifeste là où les pluies sont inférieures à 600 mm sur des sols dénudés**, et en présence de vents avec des vitesses dépassant un seuil de l'ordre de 20 km/h ou de 6 m/s sur sols secs. Egalement, il est à noter que **l'érosion éolienne peut avoir lieu également dans des climats humides lorsque certains mois de l'année sont particulièrement secs**, en plus que le sol soit préparé par des techniques culturales qui pulvérisent la surface du sol.



Figure 9 - Force érosive du vent dans un champ non protégé

En l'absence d'arbres, d'arbustes, de résidus, etc., faisant obstacle au vent, celui-ci met les particules de sol en mouvement sur de grandes distances, ce qui augmente l'abrasion et l'érosion du sol. Comme les buttes et les sommets des collines sont habituellement exposés, ce sont les endroits qui en souffrent le plus. L'absence de couvert végétal permanent donne vraiment prise à l'érosion éolienne. Les sols nus, secs et exposés sont les plus vulnérables.

### 3.3. INFLUENCE DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA FERTILITÉ DU SOL

#### 3.3.1. Effet du travail du sol

##### L'effet du labour

L'agriculture industrielle/intensive, qui utilise des machines, impose aux agriculteurs de faire des **parcelles de plus en plus grandes**. Ceci les pousse à supprimer les haies, les arbres le long des champs. Additionné à la déforestation, ceci diminue le nombre de racines qui retiennent le sol lors des fortes pluies.

Le **labour** est la technique (ou façon culturale) la plus répandue de travail du sol. La charrue ouvre le sol sur une certaine profondeur<sup>35</sup> et le retourne, avant de l'ensemencer ou de la planter. Le labour, par son travail du sol, efface les empreintes de pneus et les ornières causées par les lourdes machines de récolte. Par ailleurs, il facilite le semis par un semoir moins pesant, il permet d'enfouir profondément les restes de culture (pailles, collets, etc.), les engrais et fumiers. Il détruit les mauvaises herbes.



Figure 10 - Le labour : pour freiner la dégradation des terres il faut limiter les pratiques agricoles qui fragilisent les sols, telles que les labours fréquents ou profonds (Source : IRD-CIRAD, P. Sylvie).

35 Le labour réalisé avec une traction animale ne permet pas de descendre aussi profondément qu'avec un tracteur, beaucoup plus puissant : l'enfouissement des fumiers ou des résidus de culture est plus difficile, mais avec la traction animale l'effet sur la structure du sol est moindre et la compaction du sol est bien inférieure à celle d'un tracteur, ce qui est positif.

Mais, le labour, technique typique de l'agriculture industrielle, est un des principaux responsables de l'érosion, surtout s'il ne prend pas en compte la pente car dans ce cas le labour favorise grandement le ruissellement de l'eau et l'entraînement de sédiments vers le bas de la pente. Par ailleurs, le labour met le sol à « nu » parfois durant plusieurs mois si une plante de couverture n'est pas installée immédiatement (à la fois pour couvrir le sol et pour capter l'azote disponible en évitant ainsi la contamination de la nappe). Quand le sol est nu, il n'y a plus de racines, l'eau n'est plus retenue dans le sol et l'on accroît le phénomène d'érosion.

La technique du labour conduit aussi à la **compaction du sol** (Gagnon, 2009). Les particules de sol se réarrangent sous l'effet d'une pression externe. Celle-ci résulte de la circulation de machineries lourdes ou du passage dans le sol d'outils de travail. Les passages répétés de tracteurs, la charge importante par essieu, le travail du sol en conditions trop humides augmentent les risques. Il peut **s'installer alors un cercle vicieux** où les travaux se font sur des sols de plus en plus tassés et où les cultures ont de plus en plus de mal à se développer. La compaction entraîne une **réduction de la porosité**, donc du volume d'air contenu dans les sols. L'échange d'air entre le sol et la racine est plus difficile, et donc le travail des micro-organismes également. De plus, la compaction des sols empêche l'eau de pénétrer rapidement dans le sol lors des pluies ce qui favorise encore le ruissellement et donc l'érosion. Cet enchaînement de phénomènes a été observé et étudié à Maurice : il est dû aux machines automotrices utilisées pour la récolte de la canne.

La **perte de biodiversité du sol est notable** dans les zones cultivées intensivement<sup>36</sup>. L'utilisation de désherbants ou d'insecticides tue les vers de terre, les acariens... qui participent à « la vie du sol ». Le labour leur est également néfaste, la terre retournée étant exposée au soleil est « brûlée ». Là aussi, un cercle vicieux se met en place. La microbiologie du sol lorsqu'elle est absente, n'oxygène plus le sol, ne consomme plus les déchets organiques... Les sols sont plus pauvres en nutriments, ce qui encourage l'utilisation de produits chimiques qui tuent la faune du sol.

### La culture sans labour

Le labour est évitable. Il peut être **remplacé par les techniques culturales simplifiées**. Par exemple, les techniques du « *strip till* » (travail du sol limité, sur les bandes de semis seulement), du « *ridge till* » (sur billons), ou encore du « *mulch till* » (on travaille en surface seulement et sans enfouir les résidus de culture).

Une autre technique est celle du semis direct sous couvert associée à une rotation des cultures performante permet d'éviter le labour. La **culture sans labour** est un sujet d'actualité en raison de la recherche d'une meilleure efficacité économique des exploitations, d'une optimisation de l'énergie dépensée ou du temps de travail. Les questions posées à ce sujet par les producteurs suscitent souvent des débats : quels sont les impacts sur le sol, l'environnement, l'économie de l'exploitation, le temps de travail, etc.? Les motivations d'adoption des techniques sans labour peuvent être diverses et les conséquences aux plans agronomique, environnemental

36 Voir les travaux des chercheurs Claude et Lydia Bourguignon qui ont créé le LAMS, un laboratoire d'analyse de sol spécialisé dans l'étude écologique de profil cultural pour restaurer la biodiversité des sols.

et économique différentes d'une exploitation à une autre et même d'une parcelle à une autre. Il n'y a pas de réponse standard : les règles de décisions doivent être adaptées à chaque situation.

Il convient de **rester très prudent** : l'**acidification**, qui est un phénomène naturel, inéluctable et lent, **peut s'accroître** dans l'horizon de surface en non labour ou semis direct. En effet, l'**apport d'engrais acides sans travail du sol concentre l'acidité en surface**. Les végétaux peuvent accumuler de l'alcalinité ; le labour permet de les enfouir au sol à leur mort, ramenant un équilibre. En travail simplifié du sol, on apportera donc de 100 à 300 kg de chaux/ha/an pour rétablir un pH neutre. La chaux est un produit peu cher, indispensable au bon fonctionnement des sols (voir chapitre 5).

La **simplification du travail du sol** passe souvent par l'investissement dans un ou plusieurs outils spécialisés pour le non-labour. Par ailleurs, le passage du labour au semi direct nécessite des phases de transitions pour en tirer tous les bénéfices et d'être appréhendé dans une modification globale du système de production. La période de transition est difficile pour les agriculteurs, pour de nombreuses raisons :

- les sols ont besoin de temps pour se reconstituer. La dynamique positive n'apparaît qu'au bout de 2 ou 3 ans, lorsque les rendements viennent récompenser ce changement de pratique. **Il faut environ 5 ans pour rentrer dans un système réellement vertueux.**
- le regard des voisins est souvent mal aisé à supporter : les champs sont « sales ».
- il n'existe pas d'aides pour couvrir des risques que les agriculteurs vont assumer seuls.

Les agriculteurs qui adoptent cette technique voient l'érosion de leurs sols réduite jusqu'à parfois 90% (seules de très graves intempéries peuvent encore entraîner la terre en dehors de leurs champs). **L'explication réside dans la structure des sols**. Sans labour, les sols retrouvent de bonnes propriétés physico-chimiques (grâce à des taux croissants de matière organique et la formation d'agrégats), les réseaux racinaires ainsi que l'augmentation du nombre de tunnels créés par les vers de terre (dont le nombre est lui-même en croissance) favorisent la capacité d'infiltration de l'eau de ruissellement. La biodiversité animale et végétale augmente et restructure les sols.

### 3.3.2. Effet de la monoculture

#### Pourquoi la monoculture pose problème

La monoculture est l'installation sur la même parcelle de la même culture (ou d'un nombre très limité d'espèces) pendant plusieurs saisons consécutives (elle s'oppose à la polyculture). D'une manière générale, l'agriculture productiviste ou industrielle est monoculturelle. Si elle présente l'avantage de limiter les concurrences nutritionnelles (eau, lumière et nutriments), en revanche elle épuise le sol par des prélèvements répétés des mêmes éléments et elle pérennise le parasitisme spécifique de la culture (ex : champignons du sol, nématodes, insectes du sol). Les conséquences sont l'utilisation massive des herbicides, le rejet de nitrates, la pollution des eaux et des sols, etc. Les pratiques monoculturelles sont aussi extrêmement coûteuses en énergie



**exogène introduite** dans le système de production. En effet, cette pratique agricole est **largement déficitaire en énergie** (et surtout en énergie fossile) : pour obtenir une calorie alimentaire (l'énergie apportée via les aliments absorbés donc), il faut en dépenser 10 à 25 fois plus pour produire cet aliment (énergie utilisée sous forme de carburant pour les machines agricoles, mais aussi indirectement pour produire les engrais et les produits phytosanitaires nécessaires, sans oublier l'énergie utilisée pour la gestion des stocks denrées lors du séchage, de la ventilation, des transports, etc.).

On oublie souvent de parler de différents **autres effets associés à la pratique de la monoculture** : érosion hydrique et éolienne, risques d'inondation accrus, pullulation des ravageurs des cultures, disparition du gibier, régression des prédateurs naturels des ravageurs, etc. C'est ainsi par exemple que la monoculture du maïs sur sol ferrallitique d'Afrique de l'Ouest conduit à une chute du rendement de 28,5% (Sogbedji *et al.*, 2006). L'IFDC (2002) rapporte pour un sol ferrallitique dégradé une chute de rendement du maïs de 10 à 75% sans apport de matière organique au sol, et de 20 à 32% avec l'usage du mucuna sur deux ans de production. Ceci dénote l'importance du besoin continu de restauration des sols dans les systèmes de production continue.

#### Effets positifs de l'association culturale

L'association culturale consiste à mettre sur la même parcelle deux ou plusieurs cultures en croissance simultanée. Ce système présente l'inconvénient de donner lieu à une compétition interspécifique pour la lumière, l'eau et les nutriments. Il contribue significativement à l'épuisement rapide du sol. Toutefois, l'association culturale permet l'obtention d'une multitude d'agro-ressources en peu de temps sur un même espace. Elle peut donner lieu à une culture intercalaire si les espèces sont installées suivant un ordre spécifique. Ceci peut engendrer une amélioration de la disponibilité de l'azote dans l'association avec les légumineuses.



Figure 11 - *Mucuna pruriens*, une légumineuse intéressante en association culturale.

### Effets positifs de la rotation culturale

La rotation des cultures est un **principe agronomique de base**. Ce système consiste à mettre en place deux ou plusieurs cultures dans un ordre donné suivant les saisons ou les années de culture. Il ne présente pas d'inconvénient majeur **si l'ordre de succession des cultures est bien choisi** car certains « précédents culturaux » sont défavorables à la culture qui suit<sup>37</sup>. Par exemple **pour le haricot vert**, certains précédents sont à éviter tandis que d'autres sont conseillés (voir tableau ci-dessous, selon l'« itinéraire technique » proposé par le COLEACP). Une rotation assez longue est recommandée, ou à défaut une jachère prolongée, pour des raisons phytosanitaires et notamment pour éviter les fontes des semis dues à *Rhizoctonia solani*.

Précédents déconseillés	Précédents non favorables	Précédents conseillés
Haricot, Pois Pomme de terre Jaxatu, Aubergine Melon, Concombre, Courgette, Pastèque Laitue Gombo	Arachide Piment, Céleri, Laitue Carotte Oignon, Ail, Échalote	Céréales dont les résidus ne sont pas enfouis (maïs, sorgho, mil) Choux, Navet Bissap Betterave Manioc Patate douce Fraisier

La rotation permet d'atteindre **une meilleure exploitation du sol par les racines et une meilleure couverture du sol** tout au long de l'année. Elle permet aussi d'introduire des légumineuses fixatrices d'azote. Ainsi, la rotation « céréale – légumineuse » est la plus bénéfique à cause de la **fixation symbiotique de l'azote** atmosphérique. La disponibilité en azote pour la culture subséquente est accrue après incorporation et décomposition du mulch de ces légumineuses (Ledgard et Giller, 1995). Mais la plupart du temps, **les légumineuses à graines comestibles exportent 60 à 70%** de l'azote fixé biologiquement dans leurs gousses et graines ce qui constitue une **perte énorme** pour le sol. Le bilan en azote dans un tel système peut être négatif. Il est donc beaucoup **plus intéressant d'utiliser les légumineuses graines non consommables** comme le mucuna ou le lablab et d'incorporer au sol la matière organique résiduelle afin d'accroître la teneur du sol en azote et en matière organique.

37 Voir aussi les itinéraires techniques et guides de bonnes pratiques édités par le COLEACP.





Figure 12 - Racines de légumineuses colonisées par les bactéries fixatrices d'azote. En coupant dans un nodule, une couleur rouge apparaît ce qui permet de distinguer ces nodules des femelles du nématode à galles.

Une rotation culturale bien élaborée permet **la discontinuité dans le cycle des agents pathogènes** (champignons du sol, nématodes, ...) spécifiques des cultures. Elle permet de lutter efficacement contre les plantes adventices en cassant leurs rythmes de reproduction. La rotation culturale permet aussi un meilleur contrôle des ravageurs des cultures, qui ne trouvent plus leur plante hôte. Elle optimise l'utilisation des ressources nutritionnelles.

### 3.4. LES CONSÉQUENCES SUR LES SOLS DE LA DÉFORESTATION

#### 3.4.1. Un phénomène de grand ampleur à l'échelle mondiale

Les forêts, qui **abritent 80% de la biodiversité terrestre**, nous nourrissent, nous protègent, nous fournissent du bois et ont une fonction essentielle dans la lutte contre le changement climatique. En effet, la végétation est une source de carbone très importante : 40% du carbone terrestre y serait stocké. Chaque 21 mars depuis 2013, elles sont à l'honneur avec la *Journée internationale des Forêts*, une occasion de valoriser leur rôle primordial pour les humains et la biodiversité.

Les forêts tropicales couvraient au début du XIX<sup>ème</sup> siècle dans le monde une superficie de 16 millions de km<sup>2</sup> environ. Aujourd'hui, **moins de la moitié subsiste**. La déforestation correspond au déboisement de parcelles de forêt, suite à une surexploitation de la forêt ou afin de libérer des terres pour d'autres usages. **Chaque année, elle fait disparaître quelque 13 millions d'hectares de forêts dans le monde**. La déforestation progresse rapidement en Afrique sub-saharienne suite à la destruction ininterrompue de forêts.

La plupart des forêts du monde rendent de grands services à l'homme. La forêt couvre, protège et conserve le sol; elle fournit de l'énergie (bois de chauffe, charbon de bois), du bois d'œuvre pour la construction, des feuilles, des animaux des fruits et des racines, du miel ou de la sève pour se nourrir ou parfois pour se soigner, des éléments nutritifs puisés en profondeur (agro-foresterie); elle stocke du carbone et libère de l'oxygène; elle améliore le climat local et influence favorablement l'humidité ambiante et le rythme des pluies; elle épure l'air de ses polluants; etc. Ce sont les « **services écosystémiques** » que rend la forêt. Se priver de forêt, c'est se priver de tous ces précieux services.

### 3.4.2. Quelles sont les causes de la déforestation ?

Les causes de la déforestation en zone tropicale sont :

- l'expansion de l'agriculture (il faut **libérer des terres**) : elle peut être subdivisée en plusieurs types d'activités pouvant toutes entraîner la conversion de forêts : l'agriculture familiale à vocation vivrière telle que l'agriculture itinérante sur brûlis; ou les cultures permanentes ou semi-permanentes, qu'elles soient familiales ou agro-industrielles, et l'élevage à grande échelle.
- l'extraction du bois : le bois d'œuvre est trop souvent exploité de façon dévastatrice en régions tropicales (même si les labels de durabilité tendent à se généraliser auprès des grandes compagnies forestières). D'après Fleury (2000), les forêts tropicales auraient été exploitées pour leur bois précieux, puis pour leur bois d'œuvre, et enfin pour la production de pâte à papier.
- la production de charbon de bois ou utilisation comme bois de feu : **le bois est souvent le seul combustible disponible ou accessible aux populations** pour fournir l'énergie nécessaire à la cuisson des aliments et la transformation des produits agricoles. D'après la FAO (2005), **80 à 90% du bois prélevé en Afrique** et en Asie du Sud-Est servirait de combustible pour la préparation des repas ou serait utilisé comme bois de chauffe.
- l'expansion des infrastructures et de l'exploitation minière : les impacts du secteur minier sur le couvert forestier peuvent être directs, c'est-à-dire de l'extraction minière qui inclue la pollution ainsi qu'une dégradation de l'habitat naturel par l'élimination du substrat sur de surfaces allant de moins d'un hectare à des dizaines d'hectares en fonction du minerai recherché. Cet **impact est irréversible** sans action de réhabilitation.

### 3.4.3. Quelles sont les conséquences de la déforestation ?

Les conséquences de cette déforestation sont nombreuses :

- **Dégradation des sols** : perte de matière organique, érosion, décapage des sols. Le rôle des arbres est particulièrement important sur les pentes pour retenir le sol.
- **Perte de la biodiversité** : la destruction des forêts entraîne la disparition d'habitats naturels pour la faune et la flore. Les espèces animales et végétales concernées sont fragilisées, voire peuvent disparaître si les ressources disponibles ne sont plus suffisantes.

- **Changement climatique** : conséquences de la libération massive de CO<sub>2</sub> dans l'air.
- **Catastrophes naturelles** : grâce à leurs racines, les forêts servent à la conservation des sols, à la lutte contre **les avalanches et les glissements de terrain**, à la stabilisation des dunes de sable et à la protection des zones de littoral. La destruction des arbres entraîne des inondations catastrophiques, l'eau de ruissellement n'étant plus freinée par les plantes, des écoulements de boue (sols qui ne sont plus maintenus par l'enchevêtrement des racines).
- **Diminution de la ressource en eau** : la déforestation a un impact sur le ruissellement. Les forêts permettent de ralentir le mouvement des eaux. Les feuilles et les autres matières organiques que l'on retrouve sur le sol des forêts absorbent les eaux des pluies diluviennes et la libèrent doucement et progressivement pour le sol situé en dessous. L'eau ressurgit bien plus tard dans des sources qui alimentent les cours d'eau. Les arbres permettent de retenir l'eau et de réduire l'érosion.
- **Aggravation des maladies** : les espèces antagonistes des vecteurs (ex : moustiques) ne trouvent plus de refuge.

### Impact de la déforestation sur le sol

La déforestation a plusieurs effets directs ou indirects sur les sols, tels que :

- **Réduction de la protection des sols** : les forêts sont un moyen pour protéger les sols contre la pluie et le vent car la densité des forêts crée une protection terrestre naturelle contre les courants d'air. À cause de la déforestation, les sols sont sans protection et deviennent plus fragiles.
- **Moins bonne économie en eau** : favorisant l'infiltration de l'eau grâce à leurs racines et l'évapotranspiration grâce à leur feuillage, les arbres augmentent la rétention d'eau dans le sol. Une fois privées de leur couvert forestier, les pentes des collines perdent la capacité de réguler l'écoulement des eaux, et le niveau des cours d'eau et des rivières fluctue rapidement, ce qui entraîne souvent de désastreuses inondations en aval. La déforestation met les sols à nu et on constate alors un réchauffement des sols qui réduit l'humidité du sol. La végétation disparaît alors à cause du manque d'eau.
- **Perte d'humus** : le ruissellement des pluies entraîne une destruction de l'humus. Une fois que la déforestation s'est produite, la litière forestière est enlevée, le sol perd ses nutriments.
- **Sensibilité des sols à l'érosion** : le déboisement massif et la coupe des bois sur les flancs des montagnes rendent le sol particulièrement fragile à l'érosion hydrique (FAO, 1983). Privés de la protection du couvert forestier, les sols nus sont aussi exposés aux vents violents, à la chaleur et aux pluies intenses et les sols s'érodent rapidement. L'érosion accentue donc le ruissellement, car sur un sol érodé l'eau glisse plus facilement. Mais le ruissellement accentue aussi l'érosion : l'eau qui s'écoule entraîne avec elle le sol, ce qui peut avoir un effet abrasif sur le terrain soumis au ruissellement.
- **Structure du sol affaiblie** : le sol devient sensible au phénomène de compactage, il perd ses propriétés de rétention de l'eau, et ne peut plus abriter

une macrofaune importante (vers de terre et termites), qui lui apportait des nutriments et améliorait sa structure physique.

- **Salinisation des sols** : la déforestation des versants, conversion de superficie forestière en cultures de rentes, conduit à une augmentation des niveaux d'eaux salées dans les plaines, et à la salinisation « moderne » de vastes surfaces de sols cultivées (ex : vallée San Joaquin en Californie).

### Effet sur le réchauffement climatique

La déforestation libère dans l'atmosphère le carbone originellement stocké, engendrant une augmentation de l'effet de serre et contribuant au réchauffement climatique. Une évaluation de la FAO montre que la destruction des forêts au niveau mondial libère près de 2 milliards de tonnes de carbone dans l'atmosphère chaque année.

### Déboisement et désertification

La destruction de la forêt pour la production agricole est une cause importante de déforestation. Quand la terre est défrichée pour la mise en culture dans les zones humides et subhumides, **les arbres doivent être coupés jusqu'à la souche, ou même totalement enlevés**. Le défrichement le plus destructif est habituellement celui qui est mécanisé. Ceux qui ont seulement des outils à main ont la plupart du temps des méthodes de défrichement plus respectueuses.

Les agriculteurs itinérants opérant dans les mêmes zones pendant de nombreuses années (ou siècles) se rendent compte de manière écologique des facteurs qui déterminent si un système de culture est durable. Dans les systèmes traditionnels, les arbres sont seulement émondés, de sorte que, peu de temps après, ils repoussent activement. À condition que la culture ne soit pas poursuivie au-delà de deux ans, la végétation naturelle se régénère rapidement, **le sol est protégé**, le cycle des éléments nutritifs redémarre et les mauvaises herbes agressives ne s'établissent pas. Dans un délai de cinq ans après une période de culture courte, une voûte de forêt continue s'est reformée.

Quand de la terre de substitution n'est pas disponible pour la culture, la période de mise en culture doit être prolongée. Ceci entraîne l'établissement de mauvaises herbes, **les arbres sont progressivement détruits et, quand la terre est abandonnée, la régénération de la végétation naturelle prend beaucoup plus de temps**.

La pression foncière force parfois des familles à chercher plus de terre dans des secteurs de forêt non utilisés auparavant pour l'agriculture (ex : Guinée, Sénégal,...). En effet, en zone semi-aride, pour assurer la subsistance d'une famille, une surface plus grande qu'en zone humide doit être cultivée. Des agriculteurs sont donc parfois obligés de travailler dans des zones nouvelles (personnes déplacées ou réfugiés) et ils sont alors davantage concernés par une production alimentaire suffisante que par le souci de s'assurer que leurs méthodes sont durables. Ces agriculteurs itinérants n'ayant aucun droit sur la terre où ils s'installent, ils ont peu d'incitation à améliorer la productivité future de cette terre. La culture itinérante peut dégénérer en « **défriche-brûlis** », avec **d'importants dommages pour le sol**. Le brûlis annuel de la végétation réduit de manière drastique le retour de la matière organique au sol, en perdant ainsi les bénéfices (fertilité, meilleure structure, conservation de l'eau, biodiversité,

etc.) et la terre s'appauvrit. En outre, la repousse de la végétation après défriche pour la culture est beaucoup plus lente dans les régions semi-arides. De mauvaises herbes herbacées s'établissent rapidement, et le recyclage des éléments nutritifs peut être négligeable dans ces conditions. Si la culture à la charrue exige que la plupart des souches d'arbres soient enlevées, le rétablissement d'une couverture végétale est alors un processus largement plus long (ou parle alors de phénomène de désertification).

Les secteurs boisés communautaires ont également été dégradés par le prélèvement de bois de feu et de poteaux pour la construction qui s'est intensifié. Il est difficile d'établir des titres fonciers individuels pour l'utilisation de terres dans les surfaces non cultivables, mais une forte reconnaissance de droits communautaires serait indispensable pour encourager les associations d'utilisateurs à coopérer pour une gestion adéquate de ces zones.

### 3.5. LES CONSÉQUENCES DU SURPÂTURAGE

Les animaux sont une des composantes majeures du système de production alimentaire dans les régions arides, semi-arides et subhumides. La **valeur des fumiers** a été depuis longtemps largement reconnue dans la production agricole. Ils sont essentiels pour la production agricole durable dans la plupart des systèmes à niveau d'intrants faible et intermédiaire. Les fumiers sont aussi essentiels en tant qu'élément des systèmes de gestion intégrée de la nutrition, même lorsque des niveaux élevés d'intrants sont employés. Les bovins sont également importants comme animaux de trait et comme une marque du statut et de la richesse dans beaucoup de zones d'Afrique subsaharienne.

La croissance de la population entraîne souvent une augmentation du cheptel. Chaque pâturage peut supporter un nombre limité de têtes de bétail, en raison de la quantité de matière végétale produite et de la disponibilité en eau. Si le cheptel bovin augmente sans restriction, la pression sur les zones de pâturage entraîne une perte de végétation comestible et une dominance d'espèces arbustives, amenant ensuite à une désertification.

A mesure que la surface des terres cultivées augmente, **les meilleurs sols sont choisis pour la mise en culture, de sorte que la productivité des pâturages restants diminue**. Autour des points d'eau servant d'abreuvoir, **la couverture végétale peut être détruite et les sols compactés par le piétinement** augmentent ainsi la quantité d'eau qui ruisselle. Ceci peut aider à maintenir pleins les réservoirs d'eau, mais comme peu d'eau peut s'infiltrer dans le sol autour des zones d'abreuvoir, des inondations soudaines peuvent se produire, entraînant une **importante érosion**.





Figure 13 - Effet sur les sols de la concentration du bétail aux points d'eau  
(Source : Maliweb.net)

La gestion durable des terres exige non seulement des systèmes durables de production agricole mais également des systèmes pérennisés de production animale, ces systèmes étant de préférence intégrés (gestion intégrée de la production agricole).

Dans la plupart des zones subhumides et semi-arides, **une grande partie de la surface pâturée est brûlée chaque année pendant la saison sèche** pour la débarrasser de la vieille végétation coriace et encourager ainsi la croissance des jeunes pousses et des herbes plus nourrissantes. Le brûlis cause la perte de matière organique du sol et altère ainsi la durabilité de la production agricole. En outre, cela expose le sol aux forces érosives du vent pendant la saison sèche et de la pluie à la fin de la saison sèche. Les effets préjudiciables sur le sol peuvent être réduits au minimum en s'assurant que le brûlis est conduit tôt dans la saison sèche, mais ceci ne peut être qu'une solution imparfaite.

La surface de pâturages est largement considérée comme propriété commune et l'accès en est normalement limité aux membres d'une communauté particulière. Quand la communauté s'agrandit, le nombre de têtes de bétail utilisant le pâturage augmente, entraînant une dégradation de la terre. La pression pour réduire le nombre de têtes de bétail a été habituellement inefficace en raison du rôle social et économique joué par la propriété d'animaux.



### 3.6. LA SALINISATION DES SOLS

#### 3.6.1. Comment définir la salinisation du sol ?

La salinité d'un sol découle de la présence des solutés minéraux majeurs dissouts dans les eaux ou dans les sols. C'est la mesure de la totalité des sels dissouts (Slama, 2004). La salinisation du sol désigne **l'augmentation progressive de la concentration en sels hydrosolubles** de la solution du sol sous l'influence de facteurs naturels (**salinisation primaire**) ou anthropogéniques (**salinisation secondaire**). Le phénomène est loin d'être anecdotique car le monde perd en moyenne 10 hectares de terres cultivables par minute, dont 3 ha à cause de la salinisation (Kovda, 1983). Les sols salés couvrent de grandes surfaces, sur tous les continents et sous tous les climats.

**Tableau 2** - Surface totale et surface totale cultivée (FAOSTAT, 1997) et étendue des problèmes de salinisation toutes origines confondues primaire et secondaire, dans des pays du réseau de la FAO sur la gestion intégrée des sols pour un usage des sols salins (Mashali, Suarez, Nabhan & Rabindra, 2005).

Region	Pays	Surface totale (Mha)	Surface cultivée (Mha)	Surface salinisée (Mha)	Surface salinisée (%)
Afrique	Ghana	22,8	4,5	0,8	3,5
	Kenya	56,9	4,5	8,2	14,4
	Nigeria	91,1	32,9	5,6	6,1
	Tanzanie	84,4	4,0	2,0	2,3
Proche-Orient	Egypte	99,5	3,3	9,1	9,1
	Iran	162,2	19,4	27,4	19,9
	Syrie	18,4	5,2	0,5	2,7
	Tunisie	15,5	4,9	1,8	11,6

La salinisation du sol est une manière par laquelle **la productivité du sol peut diminuer sans perte du couvert pédologique**, un scénario similaire à celui de la pollution du sol par des produits chimiques. Le sol s'enrichit en sels solubles et acquiert, à un degré plus ou moins fort, le caractère sur-salé (Servant, 1975). Selon Cherbuy (1991) il s'agit d'un processus résultant de la migration des sels à travers le profil du sol et de leur accumulation, par précipitation en profondeur. Les sols affectés par des problèmes de salinisation présentent une concentration excessive (conductivité électrique CE > 10 dS/m) en sels hydrosolubles (**sols salins**), en sodium adsorbé dans le complexe argilo-humique (**sols sodiques ou alcalins**) ou les deux (**sols alcalino-salins**). On peut dire qu'au-delà d'une CE de 15 dS/m, pour la plupart des plantes, la culture n'est plus possible.

### 3.6.2. Quels sont les facteurs qui provoquent la salinisation ?

La salinisation résulte le plus souvent de **l'irrigation de sols mal drainés sous climat aride**. La stagnation de l'eau dans les couches superficielles du sol par défaut de drainage se traduit par une **accumulation de sels dans les horizons les plus superficiels**, car les mouvements ascendants, liés à la forte évaporation due au climat chaud et aride, excèdent de beaucoup l'infiltration et donc le lessivage.

Les **sources de ces sels** sont variables :

Le plus important est l'usage d'une **eau d'irrigation trop chargée en solutés**, combiné avec un drainage déficient et/ou une évaporation importante, est susceptible de produire un enrichissement en sel du sol qui peut devenir insupportable pour la culture. Ce processus peut être très rapide et se manifester à l'échelle de l'année, de la dizaine d'années (cas du delta intérieur du Niger au Mali) ou de quelques siècles (cas de l'Euphrate et de la Mésopotamie). Ce type de salinisation est la conséquence de **pratiques agricoles ou d'aménagements inadaptés**. La **remontée de la nappe phréatique** peut atteindre plusieurs dizaines de mètres comme dans le cas du Kouroumari au Mali (40 m en 20 ou 30 ans). L'excès de teneur en sel est l'un des soucis principaux avec l'eau utilisée pour l'irrigation. Une concentration élevée en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines. Le risque de salinisation dépend **de la charge en sel de l'eau d'irrigation**, mais, même si les eaux d'irrigation sont de bonne qualité, très peu chargées en sel, il faut garder en mémoire que **ces sels peuvent malgré tout s'accumuler** au sein de la zone racinaire à chaque irrigation sous l'influence de l'évaporation. Une eau contenant un degré élevé de salinité (CE >1,5-2,0 dS/m) et une grande quantité de sodium (RAS > 6)<sup>38</sup> ne devrait pas être utilisée pour l'irrigation sous peine de voir les rendements affectés (voir explications au point suivant et Tableau 3). En général, l'eau utilisée pour l'irrigation doit avoir un degré faible ou moyen de salinité. (i.e. conductivité électrique de 0,6 à maximum 3,0 dS/m).

	Degré de restriction imposé à l'utilisation de l'eau		
	Aucun	Faible à modéré	Important
Salinité (en dS/m)	<0,7	0,7-3,0	>3,0
Quantité totale de matières dissoutes (en mg/litre d'eau)	<450	450-2000	>2000

Néanmoins, dans certains endroits en manque d'eau, l'eau très saline peut être utilisée en tant que supplément pour d'autres sources. Un bon contrôle et une bonne gestion deviennent alors essentiels.

38 RAS: ratio d'absorption du sodium (en anglais SAR) [meq/l<sup>1/2</sup>] par rapport au Ca et Mg.



Si un fermier applique annuellement 10000 tonnes d'eau d'irrigation par hectare de récolte, entre 2 et 5 tonnes de sels seront ajoutés à cette terre chaque année. À moins que ces sels soient rincés, d'énormes quantités peuvent s'accumuler durant des années ou des décennies.

- **Le matériau géologique**, par le biais de l'altération, peut libérer les éléments nécessaires à la formation des sels solubles (altération de minéraux primaires riches en sodium, de roches volcaniques, des produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore, ou encore dissolution des évaporites, qui sont des accumulations salines anciennes).
- **L'eau de mer** est, bien entendu, une source principale de sel en milieu côtier. La salinisation peut alors être un phénomène permanent lié aux marées (salinisation marine), ou encore due à la présence de lentilles d'eau sursalées lorsque les zones basses sont isolées de la mer par un colmatage alluvial (salinisation lagunaire – exemple du Lac Rose au Sénégal). Ces zones sont très sensibles à la gestion de l'eau en amont. Une grande attention doit donc être prise pour les **zones côtières** où l'infiltration d'eau de mer pose un risque important de salinité de l'eau d'irrigation qui est alors pompée **depuis des puits**.
- La modification des régimes hydrologiques des grands fleuves, par les prélèvements ou la régulation par les barrages, peut produire un intensification de la salinisation des eaux souterraines, puis des terres. La dégradation des sols par salinisation affecte plus fortement les aménagements hydro-agricoles en zone aride ou semi-aride.
- Une **nappe phréatique**, d'origine continentale et salée par héritage géologique, peut contaminer le sol **par ascension capillaire**.
- **Certaines pratiques agricoles** (ex: déforestation) **ou des aménagements inadaptés** peuvent aboutir à la salinisation.



Figure 14 - Sol salé dans une plaine, en climat désertique : l'accumulation du sel dans la partie supérieure du sol est liée à la présence d'une nappe phréatique légèrement salée à moins de 5 mètres de profondeur (Source : Alain Ruellan, AFES).

**La présence du sodium (Na) pose un problème particulier pour les sols en cas d'irrigation.** Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément origine de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation. Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. **Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol.** Il y a donc éclatement des agrégats du sol ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau. La perméabilité des sols sableux peut ne pas se détériorer aussi vite que les sols plus lourds lorsque irrigués avec une eau de forte teneur en sodium, cependant un problème potentiel existe. Le sodium contribue aussi directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles comme les carottes, les haricots ou les oignons.

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (RAS ; en anglais SAR). Le RAS décrit **la quantité de sodium en excès** par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés en relativement grande quantité dans l'eau d'irrigation. On calcule le RAS (le sodium, le calcium, et le magnésium sont exprimé en meq/L) selon l'équation suivante :

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/2}}$$

De l'eau avec un RAS de plus de 9, ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sel est relativement bas. Un usage continue d'eau avec un RAS élevé **provoque une déstructuration du sol**. L'eau avec un RAS se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec peu de problème d'accumulation de sodium. Quand le RAS se situe entre 6 et 9, **les risques de problème liés avec la perméabilité du sol augmentent**.

Lorsque l'eau d'irrigation est saline, une valeur de RAS encore plus basse devrait être utilisée. Les problèmes dus au sodium sont aussi liés à la concentration totale en sels de l'eau d'irrigation. Par conséquent, des eaux d'irrigation avec des salinités entre 1,5 et 3,0 dS/m avec un RAS au-dessus de 4 doivent être utilisés avec prudence. Des échantillons de sols doivent être prélevés annuellement afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinité des sols.

### 3.6.3. Quelles sont les conséquences de la salinisation ?

L'accumulation de sels solubles (en particulier les sels de sodium) à la surface du sol et dans la zone racinaire provoque des effets nocifs sur les végétaux qui induisent une **diminution des rendements**, voire une **stérilisation du sol** (Mermoud, 2001). La précipitation successive de minéraux dans les sols altère non seulement leur composition, mais conduit également à différentes voies d'évolution des profils pédologiques en fonction de l'abondance relative des différents ions majeurs dans la solution de départ. Ces ions majeurs sont le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), le sodium ( $\text{Na}^+$ ), le potassium ( $\text{K}^+$ ), le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ), le sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les carbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ).

Le plus grave danger pour le sol est l'eau présente en trop grande quantité qui cause, d'une part son engorgement, et, d'autre part élève **le niveau de la nappe des eaux souterraines**. Le sol fonctionne en effet comme une éponge, aspirant par capillarité l'eau dans la zone racinaire. En surface, l'eau s'évapore peu à peu, et le sel se dépose dans la zone des racines. Les racines des végétaux doivent alors exercer une force de succion supérieure à celle utilisée par le sol pour retenir l'eau : **c'est l'« effet osmotique »**. La **pression osmotique dans la solution du sol empêche la pénétration de l'eau dans la plante**.



Figure 15 – Représentation schématique du phénomène d'osmose et de la pression osmotique.



Du fait de la présence de ces sels, on assiste à une **accumulation dans les feuilles** de certains éléments tels que les chlorures, sodium ou bore qui peuvent à terme provoquer des dommages métaboliques (intoxication) souvent irréversibles. Les **symptômes** provoqués par une intoxication au sel s'observent au niveau des cultures par les jaunissements, chloroses marginales et jusqu'à des nécroses du bourgeon terminal et des bords de feuilles. On peut aussi noter des diminutions de surface ou des enrroulements de feuilles. Dans les cas extrêmes, on observe la chute du feuillage. Le stress salin se traduit donc par une réduction du rendement des cultures.

Des **variation de pH peuvent aussi survenir suite aux phénomènes de salinisation**. À titre d'exemple, dans certains sols les sels de bicarbonates ou de carbonates de sodium s'accumulent et le pH peut monter jusqu'à 10. La fertilité y est alors considérablement réduite, car de nombreux éléments nutritifs sont insolubilisés à cette valeur de pH.

La salinisation **diminue également l'activité microbienne du sol** à la base des processus de nitrification. Enfin, les produits organiques formés changent également avec l'augmentation des composés organiques solubles et la **diminution des composés humiques**.

Les **cultures maraîchères** et arboricoles sont généralement **plus sensibles** à la concentration en sels dans la zone racinaire que les céréales.

#### 3.6.4. Evaluation du risque de salinisation des sols

Hormis les observations de la végétation (espèces halophiles présentes), pour évaluer la salinité du sol, on a recours à des **méthodes d'analyse ionique des sols**. Le seuil de tolérance à la concentration en sels dans la zone racinaire est propre à chaque espèce.

La concentration en sel est donnée par la TDS (ou Quantité Totale de Matière Dissoutes) exprimé en mg de sel par litre d'eau (mg/L) ou en g de sel par mètre cube d'eau (g/m<sup>3</sup>) (i.e. mg/L = g/m<sup>3</sup> = ppm).

La **salinité globale** est généralement déterminée en mesurant la **conductivité électrique** (CE, exprimée en déciSiemens par mètre, dS/m) de l'échantillon de sol à une température de 25 °C. La conductivité électrique est exprimée en millimhos par centimètre (mmhos/cm) ou deciSiemens par mètre (dS/m) ou microSiemens par centimètre (1 dS/m = 1000 µS/cm). **En moyenne, 1 dS/m correspond à 640 ppm de sels dissous.**

La méthode d'analyse est la suivante: 200 g de sol sec sont tamisés à 2 mm. De l'eau distillée est ajoutée progressivement pour humecter le sol qui est malaxé à l'aide d'une spatule pour obtenir «une pâte saturée». Elle est laissée en repos pendant 2 heures au minimum, avant d'être mise dans un dispositif en connexion avec une pompe à vide qui fait la filtration de la solution du sol (extrait de la pâte saturée). L'eau de filtration est obtenue par décantation et la CE peut être mesurée (les valeurs obtenues doivent être corrigées afin de les rendre à la même échelle de température de 25 °C).

Tableau 3 - Tolérance de quelques cultures à la salinité du sol (selon FAO, Bulletin N°29)

Niveaux de production (en %)	100	90	75	50	0
Cultures	Salinité de l'extrait de la pâte saturée (CE en dS/m)				
Sorgho	7	8	9	10	13
Maïs	7	8	9	10	13
Orge	6	8	10	13	20
Sorgho	7	8	9	10	13
Maïs	7	8	9	10	13
Haricot	1	1,5	2,3	3,6	6,3
Carotte	1	1,7	2,8	4,6	8,1
Oignon vert	1,2	1,8	2,8	4,3	7,4
Ail	1,2	1,8	2,8	4,3	7,4
Piment	1,5	2,2	3,3	5,1	8,6
Pomme de terre	1,5	2,2	3,3	5,1	8,6
Chou	1,8	2,8	4,4	7	12
Tomate	2,5	3,5	5	7,6	13
Pastèque /courge	4,7	5,8	7,4	10	15
Melon	4,7	5,8	7,4	10	15
Agrumes	1,8	5,4	3,4	4,9	8

La concentration en sel de l'eau d'irrigation<sup>39</sup> peut aussi être mesurée grâce à la conductivité électrique de cette eau (CEi). La relation entre la concentration en sel de l'eau d'irrigation (Ci) et sa conductivité électrique (CEi) est approximativement :  $Ci = 640 CEi$

### 3.7. LA COMPACTION DU SOL

Les sols tassés sont **moins productifs**, plus **sensibles à l'érosion** et contribuent moins aux fonctions épuratrices et «tampon» des sols. Partout dans le monde, les sols utilisés par l'homme tendent à se tasser, **perdant de leur porosité**, souvent sur 10 à 50 cm. Cette compaction est le plus souvent due aux engins agricoles, mais le surpâturage et la surfréquentation d'un milieu par l'homme peuvent y contribuer localement.

39 Pour rappel, il y a en réalité cinq principaux critères physico-chimiques pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation :

1. Salinité : contenu total en sels solubles
2. Sodium : proportion relative des cations sodium ( $Na^+$ ) par rapport aux autres
3. Alcalinité et la dureté : concentration d'anions carbonate et bicarbonate en relation avec la concentration en calcium ( $Ca^{2+}$ ) et en magnésium ( $Mg^{2+}$ )
4. Concentrations en éléments toxiques (auxquels il faudra ajouter les critères microbiologiques pour la salubrité)
5. pH de l'eau

### 3.7.1. Tassement du sol causé par le piétinement du bétail

Si la plupart des petits producteurs n'emploient d'engins agricoles lourds, dans les pays tropicaux humides leurs sols sont particulièrement exposés au tassement du sol par le piétinement du bétail.



Figure 16 – Parcelles piétinées par le bétail (Photo : Rémi Oriot).

La rapidité **d'infiltration des eaux est affectée**, les eaux de ruissellement augmentent, les racines des plantes ne pénètrent presque pas dans le sol et ont des difficultés à s'approvisionner en eau. Le tassement du sol se produit surtout au moment où il est humide, très peu lorsqu'il est sec. Le risque est d'autant plus grand que la saison pluvieuse est plus longue. Le piétinement peut provoquer la disparition du couvert végétal et une accélération de l'érosion du sol.

Les **sols sableux sont moins sensibles** en surface (Carrière, 1993). Les sols sur-pâturés sont caractérisés par des surfaces nues et des horizons compactés. La remise en culture peut être alors problématique sans un travail du sol suffisant pour rendre de la profondeur au sol (pour rappel, un des éléments clé de la fertilité).

Il faut aussi noter que le piétinement du bétail est responsable de nombreuses atteintes aux cours d'eau, ou aux retenues d'eau, en provoquant notamment une érosion des berges, une atteinte au lit de la rivière (pollution, élargissement du lit, colmatage, etc.), une dégradation de la qualité physico-chimique des eaux ainsi qu'une augmentation de la température pouvant être préjudiciable pour la faune aquatique. Ainsi, sous l'effet du tassement du sol, un plus fort ruissellement conduit à la sédimentation du lit du cours d'eau et à une augmentation de la turbidité et de la charge en éléments nutritifs de l'eau.



### 3.7.2. Compaction causée par les engins lourds

L'emploi de machines de plus en plus **puissantes et lourdes** a pour conséquence l'augmentation du compactage des sols. Il s'ensuit une compression des pores grossiers empêchant l'acheminement de l'eau et de l'air dans le sol. En roulant sur un sol mouillé avec des machines lourdes, le profil du pneu s'enfonce dans la terre et y provoque un effritement et un malaxage des agrégats, donc une **destruction de la structure grumeleuse**.

La compaction (tassement et asphyxie du sol) est souvent accompagnée de l'apparition d'une **semelle de labour** dans le cas des sols labourés. Le tassement qui induit une forte baisse de la porosité naturelle du sol est une des formes les plus graves et les plus courantes de la dégradation des sols. La compaction des sols (notamment riches en argiles et/ou limons) et de leurs agrégats a un impact négatif, direct et durable sur leur activité biologique et sur leurs caractéristiques hydrologique.

Il faut ajouter que **l'utilisation excessive ou inadaptée d'engrais chimiques et de certains amendements** (mais pas les fumiers, composts et autres engrais organiques qui améliorent au contraire la qualité des sols) **contribuent à déstructurer et tasser les sols** (par éclatement des agrégats, et diminution de l'activité biologique), toujours au détriment de la pénétration des réseaux racinaires qui normalement, avec les organismes fousseurs, décolmatent et construisent les sols.



Figure 17 - Sur sols limoneux fragiles, le passage répété d'engins lourds est un facteur d'asphyxie et de dégradation voire de régression du sol.

## 3.8. LA POLLUTION DES SOLS

### 3.8.1. Pollution et contamination

On dit qu'un sol est pollué lorsqu'il contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux pour la santé, des plantes ou des animaux.

Les sols agricoles peuvent être **pollués avant ou pendant leur mise en culture**. C'est pourquoi il est important de connaître l'«**historique du sol**» **sur plusieurs années**, surtout dans le cadre de certaines certifications qui en ont fait une exigence majeure (ex : GLOBALG.A.P. ou Agriculture Biologique).

La pollution est une **modification défavorable du milieu** naturel qui apparaît comme le sous-produit d'une action humaine, au travers les effets directs et indirects de ses activités. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers de ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques. La pollution du sol **correspond à l'accumulation de composés toxiques** : produits chimiques, sels, matières radioactives ou agents pathogènes qui, tous, ont des effets sur la croissance des plantes et la santé des animaux.

Dans une approche «milieu», le sol est interfacé avec l'eau et l'air ; la notion de pollution du sol appelle donc généralement aussi celle **de contamination d'un ou plusieurs composants des écosystèmes** (air, eau) ou potentiellement des organismes vivant en contact direct ou indirect avec le sol (invertébrés du sol, champignons en particulier). Au-delà de seuils variant selon la nature du polluant et du sol, cette pollution a une incidence sur l'écosystème.

Les effets de la pollution des sols dépendent de leur structure et de leur texture. Certains sols ont la capacité de filtrer, d'absorber et de recycler des quantités importantes de déchets ; dans d'autres sols, certains constituants toxiques ne sont pas retenus et se retrouvent dans les fleuves et dans les nappes phréatiques. **Les sols sableux sont favorables au lessivage**, alors que **les sols argileux épais retiennent mieux les polluants**. Ainsi toutes les activités humaines sur les sols doivent tenir compte des propriétés des sols et de la position de la nappes et des cours d'eau du milieu.

A noter que le sol peut aussi être contaminé par des organismes pathogènes nuisibles, soit à l'homme (ex : vers qui se transmettent à l'homme et causent des maladies), soit aux plantes (ex : champignons pathogènes ou nématodes du sol).

### 3.8.2. Origine et nature des polluants du sol

La pollution du sol est généralement due à **l'accumulation sur et dans le sol de substances** non biodégradables (ex : ETM ou éléments-trace métalliques dont les métaux lourds comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), l'arsenic (As),...), ou à l'accumulation (ex : dans la matière organique) de substances biodégradables dont la vitesse de biodégradabilité est inférieure au taux d'accumulation (ex : pesticides organo-chlorés, dioxines, etc.). Ces substances peuvent alors être stockées dans le sol ou être lessivées par les eaux de ruissèlement vers les cours d'eau voisins ou vers la nappe phréatique, ou encore s'évaporer vers l'atmosphère.

Une part importante de la pollution des sols peut provenir **des retombées de pollutions atmosphériques**, des centrales thermiques, des incinérateurs, des



fonderies de plomb et autres métaux non ferreux, des industries chimiques, de l'**agriculture** (notamment par les engrais chimiques et les pesticides), etc.

Les sols peuvent être contaminés par : des métaux lourds (ou autres éléments-trace métallique toxiques-ETM), des résidus de pesticides, des hydrocarbures (gazoil, huiles de vidange, graisses minérales), des retombées de polluants atmosphériques (ex : dioxines, PCB, HAP<sup>40</sup>).

Ainsi, certaines **pratiques agricoles** (ex : fertilisation, irrigation, apport d'amendements organiques) **sont à l'origine de l'introduction de métaux lourds** dans le sol. Les produits destinés à améliorer les propriétés physico-chimiques du sol sont souvent plus riches en métaux lourds (Pb, Cd) que le sol lui-même par exemple **les engrais, les lisiers, les composts et les boues de station d'épuration** (et même le cuivre apporté par l'application de bouillie bordelaise pour lutter contre les mildious). Ces apports ne peuvent pas être biodégradés ou assimilés rapidement et restent donc longtemps dans le sol. Des mesures ont montré la présence de teneurs importantes en ETM dans du fumier : 0,7 mg/kg MS pour le Cd, pour le Zn et pour le Pb. Certains paysans (ex : Cameroun, RDC, Bénin) utilisent les cendres d'ordures ménagères qu'ils font brûler : elles sont généralement très riches en métaux lourds du fait des piles, cartons, plastiques etc. qu'elles contiennent et qui sont libérés lors de l'incinération<sup>41</sup>.

Les déchets provenant des usines chimiques sont particulièrement riches en éléments toxiques (Naitormbaide, 2007).



Figure 18 - Certains sols sont souvent utilisés comme décharge pour les déchets ménagers et industriels. Ces sites sont parfois remis en culture du fait de la pression démographique sur les terres.

40 Voir définitions plus loin.

41 Le tri avant incinération permettrait de réduire fortement le risque : le plastique est la principale source de cadmium (Cd) dans les ordures ménagères. De même, le tri du verre induirait une baisse significative de l'arsenic (As), du chrome (Cr), du manganèse (Mn) et du plomb (Pb).

On peut donc classer les sources de pollution en **naturelles** et **anthropiques** :

### Sources naturelles de pollution des sols

Les sources naturelles sont moins fréquentes et ont des conséquences plus ou moins négligeables. Il existe cependant des sols qui sont naturellement pollués (sol riche en métaux lourds ou en hydrocarbure) par les phénomènes suivants :

- Le volcanisme (une éruption volcanique libère surtout de grosses quantités de gaz carbonique et de soufre, mais aussi des métaux lourds. On estime que les volcans libèrent en moyenne annuelle dans le monde, de 800 à 1.400 tonnes de cadmium, 18.800 à 27.000 tonnes de cuivre, 3.200 à 4.200 tonnes de plomb, et 1.000 tonnes de mercure dans l'atmosphère).
- La chute des météorites (apports anecdotiques)
- L'altération de la roche-mère (elle est riche en éléments qui sont progressivement libérés et absorbés par les racines qui explorent le sol et le sous-sol)
- Les pluies acides
- Les incendies de forêts
- L'érosion des sols (elle libère des éléments qui vont s'accumuler dans les bas-fonds qui sont souvent des zones réservées à la culture maraîchère en milieu urbain ou péri-urbain).

### Sources anthropiques de pollution des sols

Les causes anthropiques sont les plus graves car l'homme introduit dans le sol d'énormes quantités de produits naturels biodégradables dépassant la capacité d'autoépuration des sols ou des produits synthétisés à demi-vie élevés ou encore des produits non biodégradables. Les activités humaines sont donc les plus polluantes, à commencer par l'**agriculture**. Les causes anthropiques de pollution des sols proviennent d'un ensemble **d'activités humaines** :

- Les installations industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimiques,...) peuvent, dans le cas d'une fuite, d'un accident, ou encore dans l'abandon d'une usine, provoquer une pollution du site.
- L'épandage des produits phytosanitaires et les rejets des bâtiments d'élevage, des exploitations agricoles sont également à l'origine de nombreuses pollutions des sols (notamment par l'azote et les phosphates), qui vont à leur tour amener la contamination des eaux de ruissellement, et par la suite les cours d'eaux. Mais aussi : irrigation par de l'eau polluée ; fertilisation par des composts d'ordures ménagères ; etc.
- Les actions des collectivités territoriales peuvent également être à l'origine d'une pollution des sols : gestion des décharges et des stations d'épuration, etc.
- Des événements géographiquement éloignés peuvent également produire des pollutions de sols, qu'il s'agisse d'événements naturels (les retombées des cendres d'un volcan suite à une forte éruption par exemple), ou technologiques (retombées radioactives).
- Activités urbaines (transports, gestion et traitement des déchets).

Le sol peut être pollué de nombreuses façons :

- **Infiltration d'une décharge** : les déchets ménagers constituent un réel problème pour les sols surtout dans les villes où le taux d'accumulation est supérieur à la capacité de biodégradabilité des sols. Aussi la plupart de ces déchets sont peu biodégradables (comme le plastique). Mais il y a également l'usage des détergents, des solvants et d'autres composants chimiques qui finissent dans les eaux fluviales et/ou lacustres où ils entraînent l'eutrophisation. Aussi notons que les décharges contribuent fortement à la pollution des nappes.
- **Rejet de déchets industriels** : les rejets industriels, notamment composés de métaux lourds, sont les plus toxiques pour le sol. En fait, certains métaux comme le zinc et le cuivre sont nécessaires pour la croissance des plantes, mais à faibles doses seulement, alors que leur présence à plus fortes doses condamne la fertilité de la terre. Cela dit, d'autres métaux lourds sont toxiques, même à faibles quantités. C'est le cas du plomb, du mercure et du cadmium, qui causent la phytotoxicité des plantes et polluent les eaux souterraines, dont l'assainissement est des plus coûteux. **À noter aussi la pollution du sol engendrée par l'abandon des emballages de pesticides dans les champs.**
- Percolation de l'eau contaminée.
- Rupture de réservoirs de stockage souterrains.
- Une application excessive de pesticides, d'herbicides ou d'engrais (ex : certains engrais phosphatés contiennent du cadmium).
- Incorporation au sol de déchets solides (ex : enfouissement de déchets chimiques, d'ordures non triées, ...).



Figure 19 - Déversement d'hydrocarbure par négligence



## Nature des différents types de polluants des sols

Les substances présentes dans le sol sont extrêmement nombreuses. Les principaux polluants sont :

- **Les ETM** : la notion d'éléments-traces métalliques, ou ETM tend à remplacer celle de métaux lourds mal définie car englobant des métaux toxiques réellement lourds à d'autres (métalloïdes) l'étant moins. La famille des ETM comprend notamment les éléments suivants : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le cuivre (Cu), le chrome (Cr), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et zinc (Zn). Ils ont été souvent désignés comme métaux lourds, terme imprécis car certains de ces éléments ne sont pas particulièrement lourds (le zinc), tandis que ces polluants ne sont pas tous des métaux, le cas d'arsenic par exemple. Tous les ETM sont toxiques ou toxique au-delà d'un certain seuil. Leurs concentrations environnementales (eau, air, sol, organismes) résultent d'apports anthropiques (industrie, transports...) et naturels (volcanisme et altération des minéraux primaires). Ce sont des métaux lourds issus des mâchefers des fonderies ou des incinérateurs ou d'autres sources comme l'épandage des boues de station d'épuration et des composts d'ordure.
- **Les PCB** : polychlorobiphényles, aussi appelés biphényles polychlorés. Très stables à la chaleur, ils ne se décomposent qu'à des températures dépassant 1000 °C. Leur inertie chimique les rend peu sensibles aux acides, bases et oxydants. Ils sont toxiques, écotoxiques et reprotoxiques (y compris à faible dose en tant que perturbateurs endocriniens). Ce sont des polluants ubiquitaires et persistants (demi-vie de 94 jours à 2700 ans selon les molécules).
- **Les dioxines** : molécules hétérocycliques et aromatiques ayant deux atomes d'oxygène dans un cycle aromatique. Les dioxines constituent un groupe de composés chimiquement apparentés qui sont des polluants organiques persistants dans l'environnement. Dans le monde entier, les dioxines sont présentes dans l'environnement et elles s'accumulent dans la chaîne alimentaire, principalement dans les graisses animales. Les dioxines sont très toxiques et peuvent provoquer des problèmes au niveau de la procréation, du développement, léser le système immunitaire, interférer avec le système hormonal et causer des cancers.
- **Les HAP** : hydrocarbures aromatiques polycycliques. Ce sont des hydrocarbures qui ont fuité des cuves dans lesquelles ils avaient été stockés : fuel, carburants divers, goudrons, hydrocarbures aromatiques, hydrocarbures paraffiniques ou oléfiniques. Les HAP sont des molécules d'une sous-famille des hydrocarbures aromatiques. Ils sont très étudiés car ce sont des composés présents dans tous les milieux environnementaux et qui montrent une forte toxicité. Ils sont reconnus pour leur effet CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique). En 2003, ils ont été rajoutés aux produits visés par la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants et classés comme produits très préoccupants pour la santé.
- Les divers solvants utilisés en industrie.
- Les huiles usagées (ex : huiles de vidange).

- Les pesticides (produits phytoparasitaires).
- Les matières plastiques enfouies ou abandonnées sur le sol (sacs, emballages,...).
- Les restes de peintures, d'enduits, etc.
- Les résidus de l'amiante ; etc.

### Evolution des polluants dans les sols

D'une manière générale le devenir des polluants dans les sols vont dépendre des **propriétés physico-chimiques** des substances (ex: biodégradabilité, sensibilité à l'hydrolyse, solubilité, affinité pour la matière grasse, pKa, coefficient de partage octanol-eau Kow, etc.) et d'un certain nombre de comportements conjoints entre les molécules polluantes et les caractéristiques des sols (dont la teneur en argiles et matière organique). On observe dans le sol des phénomènes de biodégradation, d'accumulation, de transformation, de transport, de fixation plus ou moins réversible, etc.

Les ETM, qui peu biodégradables, vont s'accumuler dans les sols ce qui peut avoir des conséquences à long terme sur les différentes fonctions du sol :

- les micro-organismes du sol sont les premiers organismes vivants à subir l'impact de la contamination par les ETM : ralentissement de leurs activités, diminution de leur diversité et de leurs interactions ;
- une augmentation des teneurs en éléments toxiques dans le sol implique un prélèvement accru de ces éléments par les plantes cultivées. Le sol ne pourra alors plus produire des aliments de qualité suffisante pour satisfaire aux normes de santé publique.
- si les concentrations en ETM deviennent très élevées, la fertilité même du sol peut être compromise en raison de la toxicité des éléments pour les plantes, la faune et la microfaune du sol.
- les sols jouent, vis-à-vis des eaux d'infiltration et de ruissellement, un rôle de filtre épurateur qui est le corollaire de leur capacité à fixer les ETM et à les accumuler. Malheureusement, cette capacité d'accumulation n'est ni immuable, ni illimitée. La libération des ETM et leur entraînement par les eaux de ruissellement ou d'infiltration peut causer une dégradation des milieux aquatiques et réduire la qualité des eaux, qui peuvent devenir impropres à la consommation sans traitement préalable.

Certains **polluants biodégradables** (ex: la plupart des pesticides) seront plus ou moins rapidement détruits par les microbes du sol. Le sol est un écosystème qui possède (grâce aux microorganismes présents) une **capacité de détoxification** très élevée.

Les processus de dégradation des matières actives aboutissent finalement à l'obtention de molécules minérales telles que H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>. La dégradation est assurée principalement par les **organismes biologiques de la microflore du sol** (bactéries, actinomycètes, champignons, algues, levures) dont l'action s'exerce surtout dans les premiers centimètres du sol. Il existe également des processus physiques ou chimiques de dégradation, telle que la photodécomposition. Ces actions



contribuent à diminuer la quantité de matière active dans le sol et donc à réduire les risques de pollution.

Les polluants qui ne sont pas ou guère dégradés vont pouvoir **s'accumuler dans les organismes du sol ou les plantes**. Certaines plantes ont des affinités remarquables pour certains polluants: les laitues et le céleri absorbent davantage le cadmium (Cd) que ne le font les céréales. On notera que la biodégradabilité dans le sol dépend de certaines caractéristiques de la solution du sol et **particulièrement de son pH**.

La **transformation** physique, chimique, biologique ou bactériologique d'un polluant peut conduire à des métabolites sans danger ou au contraire plus toxiques que le produit initial (exemple de l'AMPA, métabolite du Roundup®).

Les **polluants très solubles** (ex: certains pesticides) **pourront être entraînés rapidement vers les couches profondes des sols** et polluer durablement les aquifères. Mais certains polluants très polaires et parfaitement insolubles peuvent aussi gagner rapidement les nappes phréatiques (hydrocarbures). À contrario, certains polluants peuvent **remonter vers la surface** à la faveur des mouvements capillaires liés à l'évaporation ou à l'évapotranspiration. Si leur tension de vapeur le permet, ils pourront être volatilisés. D'une manière générale, la mobilité d'une substance dans le sol va conditionner son devenir comme polluant.

Le plus souvent **les polluants s'adsorbent de manière plus ou moins durable sur les particules du sol**, particulièrement sur les colloïdes. Enfin, certains polluants se trouvent insolubilisés et se fixent définitivement dans la phase solide des sols. On assistera ainsi à des phénomènes d'accumulation dans certains compartiments des sols. C'est le cas des pesticides. Dès l'émission (= pulvérisation) du pesticide, le dépôt réel obtenu est de loin inférieur au dépôt théorique à cause des phénomènes de dérive, d'interception par les plantes et de volatilisation. De plus, la **concentration du sol** en pesticide (ex: herbicide) ne restera pas constante. En effet, au cours du temps, le pesticide peut :

- se fixer aux matières organiques (**adsorption** plus ou moins irréversible) ;
- se transformer (**dégradation** et/ou métabolisation par les plantes et les microbes du sol) ;
- se déplacer (**lessivage en profondeur**, transport latéral le long de la semelle de labour) ;
- se désorber du sol et **se volatiliser** progressivement dans l'atmosphère.

Cette « attraction » entre le pesticide et les colloïdes du sol est influencée par les **propriétés du pesticide** (solubilité, pKa, coefficient de partage octanol-eau  $K_{ow}$ ) et par la **composition du sol** (% matière organique, CEC ou capacité d'échange cationique, capacité d'adsorption du sol), le pH de celui-ci, sa concentration et sa disponibilité en eau. La température jouerait aussi un rôle important dans l'adsorption. Les phénomènes d'adsorption/désorption influencent beaucoup le devenir des pesticides dans l'environnement. À cause de l'adsorption, ils ne sont plus bio-disponibles, sont moins actifs et **moins dégradés par les microorganismes, et sont plus lentement entraînés dans le sol vers les nappes d'eau**. La concentration résiduelle dans la phase aqueuse du sol conditionnera l'efficacité ou non (biodisponibilité), déterminera sa persistance d'action et expliquera les effets éventuels sur les

cultures suivantes (phytotoxicité). L'**adsorption aux constituants du sol** joue, par son impact sur la concentration du pesticide dans la solution du sol au cours des heures qui suivent l'application, un rôle important sur sa **biodisponibilité**.

Le transport du pesticide vers la nappe dépend de ses propriétés physico-chimiques, de la texture du sol (micropores), de sa structure (macropores), des propriétés biologiques du sol (biomasse microbienne, nature de la microflore) et des **conditions climatiques** (intensité et fréquence des précipitations).



Figure 20 - Evolution et déplacements du pesticide dans un profil de sol (Photo B. Schiffers).

Le couteau indique le niveau de la semelle de labour (Photo B. Schiffers). Les pesticides ne peuvent plus s'infiltrer plus bas et ruissellent le long de celle-ci, jusqu'à une s'écouler dans une eau de surface.



# Chapitre 4

## Préserver et restaurer la fertilité des sols

4.1. Préserver la qualité et la fertilité des sols .....	194
4.2. Restaurer la fertilité des sols .....	217



## OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES

À l'issue de ce chapitre, l'apprenant sera capable :

- De comprendre les principes de base pour prévenir la dégradation des sols
- De connaître les techniques de lutte contre l'érosion hydrique et éolienne
- D'expliquer le rôle et l'importance du chaulage et des divers amendements pour la préservation de la qualité des sols
- De comprendre comment éviter la salinisation, la compaction ou la pollution des sols
- De connaître les techniques qui permettent la restauration de la fertilité des sols : le paillage, les cultures associées, l'apport de matière organique (compost, fumiers, lisiers) ou encore la jachère
- De comprendre l'intérêt de quelques techniques de dépollution des sols par biorémédiation.

## 4.1. PRÉSERVER LA QUALITÉ ET LA FERTILITÉ DES SOLS

### 4.1.1. Prévenir la dégradation des sols

Actuellement, **33% des terres sont modérément ou gravement dégradées** du fait de l'érosion, de la salinisation, du compactage, de l'acidification et de la pollution chimique des sols. Le taux actuel de dégradation des sols menace la capacité des générations futures à satisfaire leurs besoins les plus élémentaires. Cependant, on assiste à une prise de conscience de la nécessité d'une réforme générale des pratiques agricoles de référence. Les mesures « agro-environnementales » (dans le cadre de la politique agricole en Europe) sont des aides aux agriculteurs pour favoriser, entre autres, **les actions protection des sols**. La convention de Rio sur la diversité biologique (CDB) a mis en place une Initiative internationale pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique des sols. Divers états (USA, Japon, Canada, Australie, Brésil et quelques pays en développement) ont créé **des politiques d'observation** (inventaire et cartographie des aléas, état des lieux, cartes de risques et dangers) **et de protection des sols**.

Dans nombre de pays, et tout particulièrement dans les régions tropicales, on observe que **les systèmes de production intensive, avec une forte mécanisation**, mis en œuvre pour l'obtention de hauts rendements en produits agricoles **induisent un épuisement des sols**. Or **les sols sont fragiles, entre autres les sols tropicaux** (souvent pauvres en matière organique), et **demandent à être gérés avec précaution**, d'une part pour ne pas être soumis à l'érosion hydrique et éolienne, d'autre part pour **conserver leurs propriétés physiques** (ex : éviter la perte de structure ou la compaction), **chimiques** (ex : éviter une salinisation ou une acidification) et **biologiques** (ex : éviter de réduire la biomasse et la biodiversité), essentielles à une productivité végétale optimum dans un contexte socio-économique donné.

Pour prévenir efficacement la dégradation de la fertilité des sols, **il nécessaire d'analyser, au niveau le plus proche du terrain, les risques induits** par la nature du sol et sa teneur en matière organique, les pratiques culturales (surtout le travail du sol et la fertilisation), la topographie (surtout la pente), le climat (surtout le régime des pluies), le type de cultures implantées (surtout la couverture du sol), etc. Le **respect d'un certain nombre de principes de base** permettra déjà de réduire fortement ou de ralentir le risque de dégradation de la fertilité :

- **Réduire le travail du sol** à ce qui est vraiment nécessaire et préférer l'approche adoptée par l'agriculture de conservation : «labourage écologique» et techniques alternatives comme le «grattage» du sol (sur une profondeur de 5 à 10 cm), le semis direct dans les couverts végétaux (semis direct sans destruction préalable du couvert végétal de la culture suivante) et le strip-till (travail du sol sur la ligne de semis seulement, sans toucher aux inter-rangs). Sinon, adapter le travail à la topographie (ne pas labourer dans le sens de la pente par exemple) ou encore à la profondeur du sol.
- **Planter des couverts végétaux** pour protéger le sol de la chaleur, de l'érosion, de l'évaporation et du lessivage des éléments fertilisants par la pluie. Cela évitera aussi la compaction du sol sous l'effet des pluies fortes (battance). En couvrant la surface, le couvert étouffe les mauvaises herbes limitant ensuite le recours à des produits herbicides préjudiciables à la biologie du sol. En augmentant la teneur en matière organique du sol, il accroît sa capacité à stocker l'eau.
- **Adopter la GIFS** (ou Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols), en combinant toujours les apports d'engrais avec des apports de matière organique. Cela évitera l'acidification des sols et valorisera mieux les engrais apportés.
- **Amender le sol** : lui apporter les éléments (matière organique, chaux,...) qui permettront de maintenir une bonne structure d'une part, et de dynamiser naturellement son activité biologique d'autre part. L'amendement «nourrit le sol», alors que les engrais nourrissent les plantes.
- **Utiliser l'irrigation avec parcimonie** : éviter les apports d'eau non maîtrisés, et s'assurer d'un bon drainage pour éviter l'accumulation de sels dans la couche superficielle du sol.
- **Eviter de polluer le sol** avec des composés toxiques : pesticides, métaux lourds présents dans certains engrais ou fertilisants, hydrocarbures, déchets ménagers, etc. Respecter l'intégrité du sol.

#### 4.1.2. La lutte contre l'érosion

Nous l'avons vu, l'érosion du sol constitue l'un des problèmes les plus cruciaux auxquels l'agriculture est confrontée aujourd'hui. Cette préoccupation a conduit à l'expérimentation et à la mise au point de techniques de lutte contre l'érosion hydrique et éolienne.



#### 4.1.2.1. Lutte contre l'érosion hydrique

En connaissant les causes de ce type d'érosion, l'évolution du processus et les relations entre l'érosion et l'état du sol, on peut choisir les mesures d'amélioration. En résumant, les mesures de lutte contre l'érosion sont toujours basées sur les principes suivants :

- La réduction de la force de l'impact des gouttes de pluies, c'est-à-dire la protection du sol contre la violence directe de la pluie.
- L'amélioration de la stabilité (ou résistance) du sol, c'est-à-dire du degré auquel le sol conserve sa structure malgré l'impact de la pluie.
- La réduction de la quantité d'eau entraînant le ruissellement, ce qui permet une meilleure infiltration de l'eau dans le sol.
- La réduction de la vitesse de l'eau et le contrôle de l'évacuation des eaux de ruissellement.
- La réduction de la compaction du sol : le tassement du sol et les traces de roues qui concentrent les eaux accentuent le ruissellement. Des pneus à basse pression compactent et lissent moins la surface et réduisent ainsi la formation de rigoles.

La **présence d'une culture qui couvre bien le sol est un moyen efficace de lutte** contre l'érosion : premièrement, elle diminue la force de l'attaque des gouttes de pluie ; deuxièmement, elle diminue la vitesse de l'eau de ruissellement et enfin, elle augmente la stabilité du sol, sa perméabilité et comme conséquence la capacité d'infiltration de l'eau.

#### Privilégier les techniques de la défense et restauration des sols

Un bassin versant est un territoire qui draine les eaux vers un même cours d'eau. Pour prévenir et régler un problème d'érosion des sols, et de coulées de boue, **il est nécessaire d'agir sur l'ensemble du bassin versant** ou du sous - bassin versant, car les coulées de boue survenant en aval sont la conséquence du ruissellement des eaux sur l'ensemble du territoire en amont. L'objectif est donc de **revégétaliser d'abord l'amont des bassins-versants**, stabiliser les ravines, restaurer la productivité des terres et protéger les barrages de l'envasement, avant d'envisager l'aménagement en aval par des terrasses ou autres techniques lourdes.



Figure 1 - Défense et restauration des sols en pente sur le bassin versant.

### **Aménager les sols en forte pente**

Au cours des siècles, les paysans ont expérimentés toute une série de techniques pour lutter contre l'érosion hydrique du sol, soit par des aménagements (les terrasses en gradins ou sur murettes en pierres, la culture en bandes, les cordons pierreux, les billons, les fossés de protection, les levées de terre,...), soit en améliorant et en densifiant le couvert végétal (la remise en prairies, les cultures associées,...). Toutes ces techniques ont pour objectif de ralentir le ruissellement de l'eau le long de la pente.

- **Les terrasses en gradins**

Ce sont les aménagements **les plus connus et les plus utilisés** par les agriculteurs, mais aussi les plus compliqués et coûteux à réaliser. Ce sont des constructions qui arrivent à **casser la pente**. Ces terrasses tirent leur nom de la forme qu'elles donnent au versant lorsque celui-ci est totalement aménagé. Les successions de terrasses prennent en effet la forme d'un escalier ou de gradins. Ces terrasses, accrochées au versant, doivent s'adapter à la pente de celui-ci : lorsque la pente augmente les terrasses rétrécissent tandis que le mur (ou le talus) de soutènement prend de la hauteur.



Figure 2 - Terrasses en gradins soutenues par les talus

- **La culture en bandes**

La culture en bandes est un système moins contraignant que l'aménagement de terrasses sur le flanc d'une colline. Il s'agit de réaliser sur celle-ci des bandes d'une culture donnée, comme le maïs qui ne couvre pas bien le sol, en alternance avec des bandes de végétation plus dense, comme de petites céréales, du gazon ou une légumineuse. Une bonne partie du sol entraîné par l'eau, et lessivé est prise au piège par la bande de végétation plus dense qui pousse au-dessous. On garde la végétation originelle dans les endroits où le risque d'érosion est plus marqué et on défriche alternativement les bandes. Ainsi des bandes bien protégées contre l'érosion, alternent avec d'autres, moins protégées.

- **Les cordons pierreux**

Il s'agit de deux à trois niveaux de pierres rangées en courbe de niveau de façon à se renforcer l'une l'autre. Ces cordons de pierres ralentissent le ruissellement,



l'étalent en nappes de telle sorte qu'il s'infiltrer en moins d'une heure, provoquant ainsi la sédimentation successive des sables, des agrégats puis des particules fines humifères, lesquelles vont former une croûte de sédimentation. Seul l'excédent des eaux passe au-dessus du premier niveau de pierres. La majeure partie de celles-ci va s'infiltrer, induisant du coup le dépôt des particules fines et les débris de végétaux. Ceci peut constituer un facteur de fertilisation des sols.

Cette technique consiste à épierrer la parcelle et à regrouper les pierres de façon à obtenir une petite rangée (2 à 3 niveaux) alignée suivant les courbes de niveau. L'espacement entre deux cordons diminue lorsque la pente de la parcelle augmente. Les grès et les calcaires conviennent bien à ce type de construction. Les dimensions de ces cordons sont en général les suivantes :

- la base : varie entre 0,4 et 0,8 m ;
- la hauteur: 0,3 à 0,5 m ;
- la longueur : les plus longs peuvent dépasser 40 m.

Ces alignements pierreux sont **sensibles aux forts épisodes orageux** qui peuvent les déstructurer et provoquer leur effondrement. Les travaux d'entretien sont donc tributaires des aléas climatiques et de la solidité de la construction.



Figure 3 - Exemple de cordons pierreux

Avantage de cette technique :

- valorisation des produits de l'épierrage ;
- facile à mettre en place ;
- diminution du ruissellement et amélioration de l'infiltration ;
- construction souple et progressive ;
- technique ancestrale, largement répandue et intégrable par les populations locales ;
- consolidation biologique naturelle.

Inconvénients de cette technique :

- nécessite des pierres à proximité ;
- infiltration insuffisante lorsqu'une pente est maintenue ;
- doit suivre les courbes de niveau ;
- doit couvrir la totalité de la pente ;
- besoin de beaucoup de pierres à proximité pour étendre l'aménagement ;
- construction sensible dans les zones orageuses.

- **Les billons**

Le système de billonnage est développé en Afrique de l'Est et de l'Ouest. Il permet d'augmenter l'infiltration de l'eau en diminuant la vitesse du ruissellement grâce à la rugosité apportée par ces éléments (et donc une diminution de la quantité de sol arrachée). Il y a divers types de billons : des **billons simples** et des **billons cloisonnés**. La réalisation des billons se fait traditionnellement à la charrue tirée par deux bêtes. Elle se fait suivant les courbes de niveau afin d'économiser le travail des bêtes. Sur les parcelles maraîchères, le travail se fait exclusivement à la main (utilisation de la houe). Les billons sont construits avec la volonté de conduire l'eau de cuvettes en cuvettes. Ces billons nécessitent un entretien quotidien car ils sont sensibles aux forts orages et aux crues ainsi qu'au désherbage des cuvettes dans les parcelles maraîchères.

Les billons simples sont des petits cordons en terre d'une hauteur comprise entre 0,2 et 0,4 m installés selon les courbes de niveau. Leur largeur à la base est variable, et peut parfois atteindre 0,9 m. Ils sont utilisés sur des pentes faibles (2 à 3%).

Pour les billons cloisonnés, au lieu de billonner suivant les courbes de niveau, les billons sont connectés par des digues transversales ou traverses pour former de petites cuvettes de 2 à 10 m<sup>2</sup> entourées par des billons de terre. Les billons peuvent également être consolidés en pierres quand la parcelle se situe dans le lit d'un oued. Le système de **billonnage cloisonné est un système qui a fait ses preuves**, associé à la traction animale dans des pays en voie de développement comme le Burkina Faso et la Zambie. Ils donnent une rugosité au sol, ce qui facilite l'infiltration et ralentit le ruissellement. Ce type d'équipement sous forme de billons permet l'infiltration d'une quantité maximale d'eau : cela permet donc la culture de nombreuses espèces. Les espèces nécessitant un apport important d'eau sont cultivées dans les cuvettes et les espèces les plus résistantes à la sécheresse sont semées sur les billons.

Avantage de cette technique :

- augmentation et stabilisation des rendements par unité de surface cultivée ;
- concentration de l'eau dans des cuvettes longitudinales, rectangulaires, losangiques,... ce qui favorise l'infiltration et le stockage de l'eau dans le sol ;
- ralentissement du ruissellement par une augmentation de rugosité du sol due aux billons ;
- double culture possible dans le fond des cuvettes et sur les billons suivant l'exigence des plantes en eau.



Inconvénients de cette technique :

- possibilité de favoriser le ravinement si les billons ne sont pas réalisés rigoureusement selon les courbes de niveau ;
- sensibilité forte aux excès d'eau dus aux orages ou aux crues ;
- difficulté de réalisation sur des pentes supérieures à 12%.



Figure 4 - Installation de billons simples dans une cuvette maraîchère

- **La création de bandes enherbées**

Ces bandes enherbées, installées sur la pente, sont d'une vingtaine de mètres de large, et favorisent l'infiltration.



Figure 5 - Bandes enherbées installées pour lutter contre l'érosion du sol

- *La remise en prairie*

La prairie constitue sans nul doute l'un des moyens les plus efficaces pour réduire l'érosion des sols. Quand les prairies sont situées sur les versants, elles limitent le phénomène d'érosion, et tamponnent le ruissellement provenant de l'amont. Quand elles sont situées en fond de vallée, elles piègent les sédiments et évitent leur transport vers les rivières. Dans ce dernier cas, elles permettent également de tamponner les crues des cours d'eau en jouant un rôle de rétention temporaire.

- *L'orientation, la taille et la forme des parcelles*

Dans la mesure du possible, il est préférable de **travailler les parcelles perpendiculairement à la pente**. Ceci permet de diminuer la vitesse de ruissellement ainsi que le risque de ravinement et de coulées de boues. Il est possible de labourer la parcelle parallèlement aux courbes de niveau jusqu'à une pente d'environ 12-13%; au-delà les risques de retourner le tracteur sont trop importants. De plus, l'agriculteur travaille généralement sa parcelle dans l'axe le plus long, puisque cela lui demande de tourner le tracteur moins souvent et lui permet de gagner du temps. Il faut donc que la parcelle soit alignée approximativement avec les courbes de niveau pour cette technique. **La culture suivant les courbes de niveau est une technique de conservation comprenant labour et plantation des cultures** à angle droit par rapport à la pente, en suivant les courbes de niveau du terrain. Ce faisant, on oriente la rugosité du sol due aux mottes et aux petits creux, on les oriente perpendiculairement à la pente de telle sorte que l'on ralentit au maximum la nappe d'eau qui pourrait ruisseler.



Figure 6 - Labour selon les courbes de niveaux au Brésil (Source : FAO)



Avant de commencer le labour, un nombre de mesures topographiques utilisant des points d'orientation permanents doivent être effectués. Pour cela, les sillons doivent être aussi horizontaux que possible. Cependant, on constate que cela ne donne pas de bons résultats. L'eau peut s'accumuler à un point légèrement plus bas et endommager le sillon ainsi que ceux situés plus bas. Les conséquences peuvent être désastreuses. Il est donc préférable de creuser les sillons à un angle d'environ 1%, afin de pouvoir recueillir l'eau de ruissellement et de l'évacuer au moyen d'un canal de drainage. Le sillon ne doit pas avoir plus de 100 mètres de longueur, si l'on veut éviter les inondations et réduire la vitesse du courant. On peut utiliser des canaux de drainage, à condition qu'ils soient protégés par une couverture végétale.

**Des diguettes de terre construites à intervalles réguliers dans les sillons permettent de contrôler la vitesse de l'eau.** Ce système est connu sous le nom de «*ridging tied*». Si les pluies ne sont pas trop fortes, toute l'eau s'infiltrera dans le sol. Cette méthode est efficace dans les zones sèches.

C'est une mesure simple et efficace qui peut être combinée avec la construction de terrasses et avec la culture en bandes pour en augmenter l'efficacité.



Figure 7 - Exemple de ridging tied (Source : FAO).

#### 4.1.2.2. *La lutte contre l'érosion éolienne*

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise à deux niveaux :

- **augmenter la cohésion du matériau** face à cette agression ;
- **réduire la vitesse du vent** à la surface du sol.

##### **Augmenter la cohésion du matériau**

L'apport de matières organiques dans les horizons superficiels du sol améliore sa structure. Là où on dispose d'eau, l'irrigation d'appoint peut être une méthode efficace et rentable pour réduire les problèmes d'érosion éolienne. Il suffit en effet, d'irriguer le sol avant la saison des pluies normales pour permettre le labour dans de bonnes conditions et l'installation d'un couvert végétal avant les tornades qui, généralement, causent des dégâts au début de la saison des pluies.

##### **Augmenter la rugosité de la surface du sol**

Il s'agit de techniques culturales laissant à la surface du sol **de grosses mottes ou des billons perpendiculaires à la direction dominante des vents**. Ces billons ne doivent pas dépasser 40 cm de haut, sans quoi le vent décoiffe le sommet des billons et accélère l'érosion.

Une autre méthode de lutte très efficace consiste à **laisser les résidus de cultures sur le champ**. On constate, par exemple, au Burkina Faso, que les tiges de mil et de sorgho, lorsqu'elles sont coupées à 1 m et sont laissées verticales à la surface du sol, piègent un volume important de poussières mais également les feuilles d'arbres qui sont soufflées par les vents à l'époque des tornades.

##### **Installer les brise-vent**

Dans les zones soumises à des vents violents, mais de direction régulière, **l'installation de haies vives et de brise-vent** sont des méthodes bien connues. Leur rôle est double : ralentir la vitesse du vent pour réduire l'évaporation et l'érosion éolienne. Un brise-vent permet de réduire de 20% la vitesse du vent. Son efficacité s'étend sur dix à douze fois la hauteur du brise-vent en aval et en amont. Mais cette protection dépend de **la perméabilité du brise-vent** : une faible perméabilité provoque une plus grande réduction de vitesse, mais sur une largeur protégée plus faible. D'après Heusch (1988), si on réduit trop la vitesse (plantation trop dense), la température s'élève et les plantes grillent le long du brise-vent.

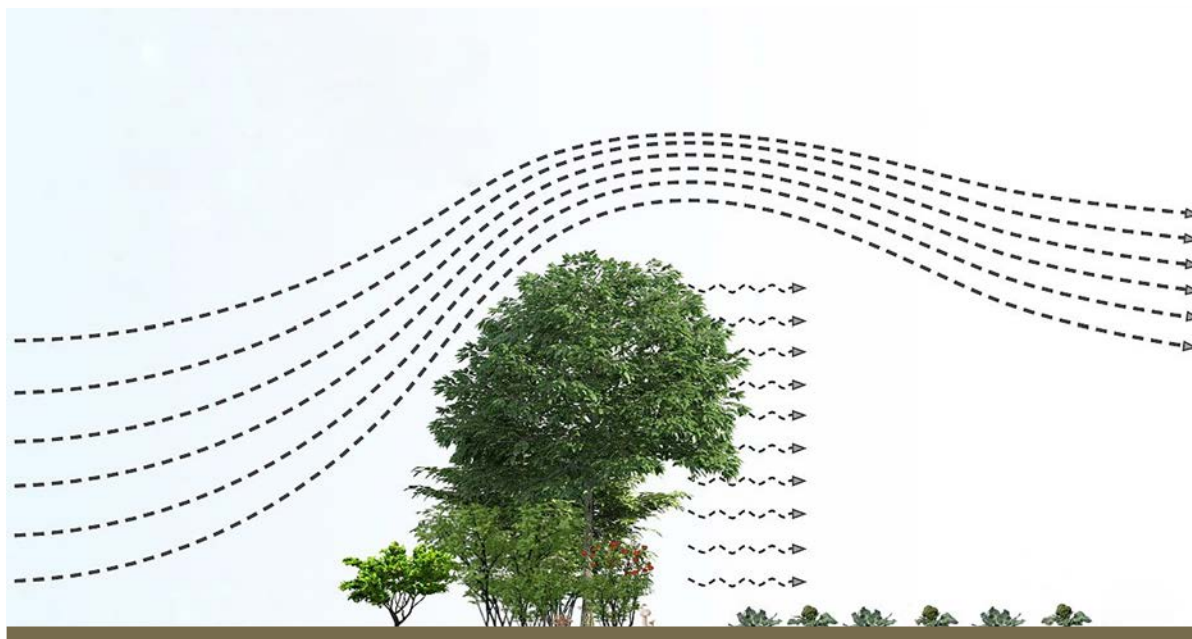


Figure 8 - Principe d'un brise-vent efficace

L'idéal est de reconstituer un parc d'arbres adultes pour freiner plus régulièrement la vitesse du vent. Dans les conditions tropicales semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, les grands parcs naturels d'*Acacia albida* qui recouvrent les zones cultivées protègent généralement assez bien ces zones fragiles contre l'érosion éolienne en **réduisant la vitesse du vent au ras du sol** mais aussi en déposant à la surface de celles-ci quantité de feuilles.

Pour pouvoir être utilisée comme brise-vent, les essences forestières doivent posséder les caractéristiques suivantes :

- des feuilles persistantes ;
- une croissance rapide ;
- un encombrement réduit ;
- un système racinaire tel que la concurrence des racines soit limitée.

Une autre méthode, peu coûteuse et bien adaptée à l'Afrique de l'Ouest, consiste, en pleine saison des pluies, à semer des lignes ou des carrés de mil ou d'autres espèces végétales qui ont une croissance rapide et qui vont assurer une fixation ultérieure des sols. La protection intégrale de ces sites contre le pâturage et les feux est évidemment indispensable pour assurer la survie déjà difficile des plantations, mais on peut prévoir une exploitation légère et surveillée de la production végétale par des troupeaux au bout de cinq ans.

### Installer des toiles comme brise-vent

Dans le cas fréquent où les vents dangereux soufflent de plusieurs côtés, on est amené à utiliser plutôt des toiles perméables au vent, grâce à une maille d'environ 5 à 10 mm.





Figure 9 - Exemple de toile utilisée comme brise-vent

Il est aussi possible d'installer de plus petites toiles carrées en plastique sur une hauteur de 50 à 80 cm. Dans ce cas, on les installe en procédant à un quadrillage du sol en carrés dont les dimensions seront d'autant plus petites que les vents sont violents. Ces mailles peuvent varier de 5 x 5 m à 8 x 8 m dans les conditions habituelles. Cependant, ces toiles plastiques peuvent être détruites ou fragilisées par les U.V. des rayons solaires au bout de deux ans.

### Fixer les dunes

Il s'agit d'une part d'éteindre la source des sables et d'autre part de fixer les dunes sur place. Pour ce faire, il est fait appel à la fois à la fixation mécanique et biologique. Au cas où la direction des vents est unique, il est possible d'arrêter l'érosion éolienne par des lignes perpendiculaires à ce vent, distantes de vingt fois la hauteur de ces lignes. Par exemple, si on utilise des tiges de mil ou de sorgho de 1 à 1,50 m de hauteur, il faut prévoir des lignes tous les 20 m sans quoi le vent reprend les sables entre ces lignes de défense. Il est donc nécessaire d'avoir des quantités très importantes de matériaux (tiges de mil, lauriers roses qui poussent dans les oueds, palme ou résidus de la taille des forêts ou des plantations arbustives qui se trouvent dans la région).

### 4.1.3. Maintenir la qualité des sols : le chaulage

Pour rappel, le calcium joue un rôle déterminant sur les fertilités **physique** (stabilité des structures du sol, sensibilité à la battance, échanges gazeux et hydriques...), **chimiques** (fonctionnement de la CEC, désalinisation...) et **biologique** (activité de la biomasse microbienne...) du sol. Secondairement, le calcium est aussi un élément nutritif pour les plantes.

Selon Hérody, le rôle essentiel du calcium n'est pas seulement de lier la matière organique avec les argiles mais de **réguler la mobilité des métaux dont celle du fer** impliqué dans les liaisons organo-minérales. Dans les sols ayant développé de telles liaisons, le chaulage améliore la stabilité structurale ; dans les autres, il limite la réactivité chimique de l'aluminium, du fer et du manganèse et améliore l'activité biologique. Il ne faut toutefois pas chauler de manière excessive car on peut aller jusqu'à bloquer les métaux cités et les autres oligo-éléments comme dans les sols calcaires. Pour une gestion raisonnée du **chaulage en cultures**, il est commode de distinguer les **apports d'entretien et de redressement**.

*Objectifs du chaulage :*

<b>STRUCTURE</b>	<b>Stabilisation du complexe organo-minéral</b>
<b>MICROBES</b>	<b>Stimulation de l'activité par compensation de l'acidification</b>
<b>GEOCHIMIE</b>	<b>Diminution de la toxicité par immobilisation des minéraux en excès</b>
<b>MICROBES</b>	<b>Développement et nutrition des plantes</b>

Mais la teneur en calcium dans les sols varie constamment et ce qui importe est le calcium « échangeable »<sup>42</sup>. La teneur en calcium devrait être mesurée fréquemment et maintenue à un niveau acceptable par rapport au type de sol auquel on a à faire. Il y a lieu de distinguer :

- les sols **calcaires**, toujours riches en calcium actif ;
- les sols **non calcaires**, mais **bien pourvus en calcium échangeable** ;
- les sols **non calcaires**, **pauvres en calcium échangeable** (les plus souvent sur terrains siliceux et acides).

42 Voir chapitre 1 pour plus de détails sur le calcium échangeable.



Connaître la teneur en calcium échangeable est essentiel pour évaluer, associée à la valeur de la capacité d'échange cationique (la CEC), le taux de saturation partiel en calcium de la CEC et ainsi pouvoir adapter les stratégies de chaulage en sols acides ou ayant tendance à s'acidifier.

Cette méthode diagnostic est moins sensible aux variations saisonnières que celle basée uniquement sur la prise en compte du pH.

Il est possible de se référer au tableau suivant (Tableau 1) pour élaborer sa stratégie de chaulage.

**Tableau 1 :** Critères pour choisir une politique de chaulage en fonction de la nature du sol.

Critères	Sols très acides	Sols acides	Sols neutres	Sols alcalins
pH <sub>eau</sub>	< 5,5	5,5 à 6,5	6,6 à 7,4	> 7,4
pHKCl	< 4,8	4,9 à 5,5	> 5,5	Non mesuré
Ca/CEC	< 40%	35 à 65%	65 à 100%	>90%
Calcaire total	0	0	0 à 20 g/kg	20 à 800 g/kg
Calcaire actif	0	0	Voisin de 0	1 à 250 g/kg
Politique de chaulage	Chaulage de redressement impératif (pour éviter les risques de toxicité aluminique) + Chaulage d'entretien	Chaulage de redressement nécessaire : si pH < 5,8 à voir selon la valeur du rapport Ca/CEC ou S/T si pH > 5,8 Chaulage d'entretien dans la plupart des cas	Chaulage de redressement inutile Chaulage d'entretien selon la valeur du rapport Ca/CEC ou S/T ou si l'état structural du sol peut être amélioré	Chaulage inutile

*S/T = taux de saturation du complexe*

*pH KCl : pH d'une suspension de terre dans une solution de chlorure de potassium.*





Figure 10 - Chaulage d'une terre (opération lourde qui peut demander un matériel conséquent)

### *Quand ne faut-il pas chauler ?*

Il ne faut pas chauler un sol immédiatement après un apport de fumier ou de lisier frais. Il ne faut pas non plus épandre des engrais de ferme sur de la chaux, car cela déclenche une réaction chimique qui volatilise l'azote ammoniacal des engrais de ferme.

Il ne faut pas chauler durant les 12 mois qui précèdent une culture de pommes de terre (risque de galle, une maladie causée par un champignon du sol).

Il ne faut pas chauler avant une culture de tabac.



Les effets d'un chaulage ne sont **jamais immédiats**, ils se manifestent durant l'année ou les années qui suivent l'apport. L'apport de ces amendements ne doit jamais être réalisé sans une analyse préalable des besoins des sols.

#### 4.1.3.1. *Le chaulage d'entretien*

Son objectif est de **préserver l'état calcique** jugé satisfaisant. Il consiste à apporter régulièrement (tous les 3 à 4 ans) un amendement basique destiné à maintenir le pH et à restituer au sol les quantités de calcium et de magnésium utilisées au cours du temps. On évalue les quantités à apporter en fonction des exportations des cultures, du lessivage et de l'action acidifiante des engrais minéraux. En moyenne, les pertes (exportations + lessivage) sont de 150 à 450 kg/ha de CaO. Il est donc généralement conseillé d'apporter environ 350 kg/ha de CaO chaque année. L'amendement doit avoir une action **moyennement rapide**, de façon à éviter un relèvement temporaire excessif du pH, relèvement cependant inéluctable, mais qu'il faut limiter. La chaux pulvérulente est à éviter car son action est trop rapide. Si on y est contraint, il faut modérer la dose et augmenter la fréquence des apports. L'amendement le plus adapté est sans conteste **une craie broyée**. Les apports d'entretien étant prévisibles, ils devront être effectués avant les cultures les plus sensibles à un état calcique déficient. Inversement, on évitera de chauler avant certaines cultures, comme la pomme de terre.

#### 4.1.3.2. *Le chaulage de redressement*

Son objectif est d'**obtenir un état calcique plus favorable**. Il consiste en l'apport important d'amendements basiques de manière à redresser le pH du sol. Normalement, le chaulage de redressement n'est à pratiquer qu'une seule fois sur la saison, en un seul apport ou éventuellement en plusieurs apports si la déficience est très importante. L'amendement doit agir assez rapidement pour entamer la correction souhaitée, c'est donc un amendement à action rapide qu'il faut retenir. À la quantité nécessaire au redressement on ajoutera quelques tonnes à titre d'entretien jusqu'à la prochaine intervention. Le **redressement complet de l'état calcique sera progressif**, car un apport trop important de chaux en une fois modifie trop vite les caractéristiques du sol. Il est préférable de répartir le redressement de pH sur plusieurs années. Il ne faut pas relever le pH de plus d'une unité à la fois sous peine de bloquer certains éléments. L'augmentation du pH suite à un apport d'amendement basique réduit la disponibilité d'oligo-éléments comme le bore, le manganèse, le zinc et, à un degré moindre, du cuivre. La carence en manganèse est assez fréquente, en particulier dans les terres légères (soufflées, aérées). Un pH trop élevé ou un chaulage excessif accentue le risque de carence. La disponibilité du phosphore dans le sol est également influencée par le niveau de pH. Elle est faible pour des pH basiques (> 7).

#### 4.1.3.3. *Les produits à utiliser pour le chaulage*

Les apports en calcium se font le plus souvent à partir de **chaux** et de **calcaires**. On peut utiliser des produits «**crus**» (calcaires broyés, des craies, de la dolomie, des marnes, des résidus industriels (sucrieries), du plâtre ou du gypse et divers engrais minéraux) ou des produits «**cuits**»<sup>43</sup> (dans les produits cuits, on retrouve les chaux à proprement parler, c'est-à-dire la chaux vive (oxyde de calcium ou de magnésium) et la chaux éteinte (hydroxydes de calcium).

43 Ils sont chauffés à 900 ou 1000°C. Par ce procédé on peut obtenir des chaux vives calciques ou magnésiennes.



D'une manière générale, les produits crus sont moins chers, et donc **beaucoup plus utilisés**, que les produits cuits, mais ils ont une action moins rapide. De même, une chaux fine est plus coûteuse qu'une chaux grossière mais sa vitesse d'action est plus rapide. Les produits fins sont en effet plus actifs que les produits grossiers, mais leur réactivité est à double tranchant car elle engendre plus de risques de blocage et plus de sensibilité au lessivage : pour éviter ces inconvénients, il faut les réserver pour des apports annuels à petite dose, ne dépassant pas 500 kg/ha de produit brut en sol sablo-limoneux.

Pour choisir son produit, il convient de se renseigner sur :

- le prix des différents amendements par unité neutralisante ;
- la richesse du sol au point de vue magnésium ;
- la rapidité d'action souhaitée.

### *La Valeur Neutralisante qu'est-ce que c'est ?*

Les teneurs des amendements basiques sont exprimées en équivalent CaO, même si leur formule chimique est différente. Par convention, 1 kg de CaO équivaut à 1 unité neutralisante.

L'efficacité d'un amendement basique est déterminée par sa valeur neutralisante (VN) et sa rapidité d'action. La VN correspond au nombre d'équivalents CaO qui ont, sur le sol, le même impact que 100 kg de l'amendement considéré. La VN s'exprime donc en kg CaO/100 kg de produits.

Le magnésium (MgO) a une VN supérieure à celle du calcium. Ainsi 1 kg de MgO équivaut à 1,4 équivalents CaO ou unités neutralisantes.

La rapidité d'action est appréciée par la finesse de mouture et par la solubilité carbonique. La solubilité carbonique est une mesure en laboratoire de ce qui se passe au champ au niveau de la dissolution du produit. Elle s'exprime par un nombre compris entre 0 et 100. En ce qui concerne la finesse de mouture, plus un produit est fin, plus sa VN s'exprimera rapidement.



Comme produits crus, on peut utiliser notamment :

- *La dolomie ou calcaire magnésien* ne se justifie que sur les sols à la fois pauvres en calcium et en magnésium. Sous cette forme, le magnésium est assez lentement disponible. Pour une action rapide, il faut choisir des formes sulfate comme la kiesérite.
- *Le lithothamme (Lithothamnium calcareum)* est une algue très calcaire issue de la famille des Corallinacées, qui concentre de nombreux minéraux et oligo-éléments. Le lithothamme est réputé être un produit « noble », riche en magnésium, en oligo-éléments (dont iode, soufre, fer, manganèse, zinc, sélénium, bore, cuivre, cobalt, ...). À finesse équivalente, il agit un peu plus vite qu'un calcaire ordinaire mais son usage est rare car son coût nettement supérieur aux autres amendements. Il est plus utilisé pour fertiliser les sols en agriculture biologique car, selon ses partisans, il rétablit les équilibres

biologiques, chimiques et physiques du sol en augmentant l'activité microbienne et le processus d'humidification. Il renforcerait aussi la résistance des plantes aux maladies et aux insectes.

- *Les marnes* sont une famille de produits très hétérogène en termes de teneur en calcaire (pouvant varier de 30 à 70%) et de qualité des argiles. Ils peuvent être apportés à dose élevée mais leur coût l'est également.
- *Les calcaires «grossiers»* sont finalement les produits les plus intéressants et les moins chers, malheureusement pas les plus faciles à trouver dans le commerce ; ils sont dénommés 0-2 ou 0-4, pour signifier que les particules sont inférieures à 2 ou 4 mm. Ils contiennent une fraction de poudre plus ou moins importante qui est efficace dès la première année et la fraction plus grossière est progressivement attaquée en fonction de l'activité microbienne. Ces produits ne sont pas lessivables et ne risquent pas d'entraîner des phénomènes de blocages.

Attention, en agriculture biologique, les produits autorisés par la réglementation sont avant tout des **carbonates de calcium d'origine naturelle**, c'est-à-dire des roches calcaires plus ou moins pures, plus ou moins dures et plus ou moins finement broyées. Le produit agira d'autant plus vite qu'il sera plus tendre (craie par exemple) et plus réduit en poudre. Les «impuretés» contenues dans le calcaire peuvent être très intéressantes si elles corrigent une insuffisance du sol : les produits commerciaux mettent en avant surtout le magnésium présent dans les calcaires dolomitiques. Il existe également des calcaires phosphatés, ferrugineux, potassiques... ou argileux (marnes). Tout élément accessoire est intéressant s'il corrige une carence et devient nuisible s'il augmente une richesse naturelle.

#### 4.1.4. Gérer le risque de salinisation des sols

Il existe plusieurs moyens de prévenir ou de corriger la salinisation : une meilleure gestion de l'eau (économie en eau du sol et irrigation quand c'est nécessaire), la lixiviation, le drainage et enfin l'inondation des terres.

##### 4.1.4.1. Une meilleure utilisation de l'eau d'irrigation

L'irrigation par aspersion est plus efficace que l'irrigation de surface, mais elle peut aussi déposer des sels directement sur la plante si l'eau d'irrigation est saline. Il est préférable de pratiquer l'irrigation au goutte-à-goutte qui mesure la quantité d'eau distribuée à la surface autour de la plante. Certaines cultures tolèrent mieux le sel que d'autres. Mais il arrive parfois que les agriculteurs - voire des régions entières - doivent repenser leur système de cultures pour le rendre plus rentable. Au Cap-Vert, par exemple, les agriculteurs ont abandonné les cultures de canne à sucre nécessitant beaucoup d'eau au profit de l'horticulture de valeur, comme les tomates, irriguées au goutte-à-goutte.

##### 4.1.4.2. La lixiviation

En donnant aux cultures juste un peu **plus d'eau que nécessaire** - mais sans exagérer - on réduit la salinité dans la zone racinaire et **les sels sont dissous et transportés** dans la couche aquifère qui les disperse, à condition que le drainage naturel soit suffisant.

#### 4.1.4.3. Le drainage

Des fossés ou des tuyaux souterrains peuvent **emporter l'eau saline**. Un tiers des terres salines gorgées d'eau pourraient être bonifiées grâce à un meilleur drainage et à toute une série de techniques adaptées à la situation locale. Par exemple, au cours des 30 dernières années, le programme national de drainage égyptien a affronté la saturation en eau et la salinité des sols en utilisant différents types de drainages et de stations de pompage, ce qui a permis de faciliter l'écoulement et de réutiliser les eaux de drainage.

#### 4.1.4.4. L'inondation

Des terres regorgeant de sel rendues incultivables peuvent parfois être remises en état grâce à **la submersion et au drainage**. Cette méthode, souvent coûteuse, peut valoir la peine en fonction de la valeur des terres et des cultures, car les terres agricoles remises en production permettent de **piéger le carbone** présent dans l'atmosphère. Dans les cas où les terres sont encore un tant soit peu productives, les agriculteurs peuvent semer une culture tolérant un certain degré de salinité et nécessitant une grande quantité d'eau d'irrigation, comme le riz. L'inondation des terres a aussi dans certains cas un effet bénéfique sur la réduction des populations de ravageurs dans les sols (ex: nématodes du sol qui ont besoin d'oxygène pour survivre; en outre certains bactéries anaérobiques – comme *Clostridium* – libèrent des toxines qui détruisent les larves ou les autres formes de survie des nématodes telles que les kystes ou les œufs).

#### 4.1.5. Prévenir la compaction des sols

La dégradation et l'amélioration des sols varient ainsi en fonction du lieu, de l'usage du terrain et des objectifs des acteurs agricoles. Les solutions proposées pour répondre aux problèmes de la compaction des sols peuvent être classées en deux catégories; **les mesures préventives et les mesures curatives**.

**La prévention** implique le recours à des mesures de conservation qui maintiennent en état les qualités productives du sol. Selon AGRIDEA (2014), les mesures de prévention repose sur **3 piliers** :

- la planification des interventions culturales;
- la limitation des charges supportées par le sol;
- la maîtrise des propriétés physiques du sol.

##### 4.1.5.1. Planification des interventions culturales

- **Adapter le type d'exploitation agricole a son terrain:** les grandes cultures et l'exploitation intensive (p. ex. cinq à six coupes pour les herbages) doivent plutôt être pratiquées sur des sols profonds qui sèchent bien.
- **Travail ciblé du sol:** plus le travail du sol est intensif, plus la structure du sol est ameublie et plus le sol perd de sa portance. Il convient donc de limiter le retournement du sol, travailler le plus superficiellement possible et réduire au maximum l'intensité du travail (vitesse réduite pour les appareils à entraînement par prise de force, réduction de la surface travaillée).

- **Diversifier la rotation ou succession des cultures dans le temps** : associer ou alterner des plantes avec des racines de profondeurs différentes comme culture(s) principale(s) (p. ex. laitue, gombo, maïs, amarantes,...) culture(s) dérobée(s)<sup>44</sup> et engrais vert(s) (p. ex. *Tithonia diversifolia*, *Prosopis africana*...). Sélectionner des systèmes de culture où se mêlent plantes cultivées, couvert herbacé et, selon qu'il convient, des plantes agroforestières dotées de racines primaires vigoureuses (systèmes racinaires denses et fibreux) capables de pénétrer et de rompre les sols tassés.
- **Appliquer des jachères courtes** : planter des espèces agroforestières à croissance rapide capable de générer de la biomasse foliaire de qualité sur une période d'un ou deux ans afin de restaurer la fertilité du sol (ex : *S.sesban*, *G.sepium*,...).
- **Considérer la date de récolte comme un facteur de risque** : une récolte tardive, par exemple, réduit la probabilité d'avoir de bonnes conditions pédologiques (ex : si le sol est plus sec au moment de la récolte).
- **Planifier la récolte** : si les conditions d'humidité sont critiques, limiter le volume de charge et décharger la récolte plus souvent (ex : faire plusieurs tas).

#### 4.1.5.2. Limitation des charges supportées par le sol

- **Limiter le passage de véhicules<sup>45</sup> au strict nécessaire, en particulier sur les sols nus** : réduire le nombre et la fréquence des interventions culturales, n'effectuer d'opérations agricoles ou forestières que lorsque la teneur en humidité du sol le permet, jusqu'aux niveaux les plus profonds.
- **Augmenter au maximum la surface de contact des pneus avec le sol** : choisir des pneus aussi grands et larges que possible, utiliser des roues jumelés, opter pour des Essieux tandem ou Kurmann pour les remorques autochargeuses ou les épandeurs à lisier.
- **Adapter les machines et véhicules utilisés sur le terrain à la résistance du sol** : Disposer d'un système de régulation de la pression de gonflage des pneus (pression de gonflage des pneus, si possible en dessous de 1 bar). Le système de régulation permet de réduire la pression de gonflage des pneus. Cela augmente la surface de contact lorsqu'on passe avec les machines. Le but est que le pneu soit déformé par le terrain et non l'inverse ! Pour rouler sur la chaussée, on rétablit la pression de gonflage des pneus (excepté pour les pneus spéciaux).
- **Choisir les machines en fonction de leur taille (et donc de leur poids !)** : éviter les excès en matière de dimensions et de machinisme.
- **Préparer le passage du véhicule** : avoir toujours un œil sur la charge par roue, notamment lors des récoltes et de l'épandage d'engrais de ferme. En principe, les charges supérieures à 3 tonnes sont critiques et ne sont supportables que dans de bonnes conditions (sol sec et bons pneus).

44 Culture dérobée : Culture que l'on plante entre deux cultures annuelles principales.

45 Par extension, toutes les charges sur le sol. À ce titre les roues des pivots d'irrigation sont également concernées par le risque de compaction du sol.

#### 4.1.5.3. *La maîtrise des propriétés physiques*

- **Évaluer l'humidité du sol sur la base des conditions météorologiques des jours précédents** : après de fortes précipitations, il faut laisser sécher le sol suffisamment avant de rouler dessus.
- **Laisser une quantité suffisante de matière organique du sol** afin d' améliorer et stabiliser la structure.
- **Engrais de ferme, engrais verts et résidus de récolte** : L'épandage régulier de fumier, compost ou la pratique de semis directs favorisent la structure du sol et stimulent son activité biologique.
- **Surveiller le pH** : sur les surfaces avec un pH bas (inférieur à 6,2), utiliser des engrais à effet basique ou de la chaux d'entretien. Un pH neutre favorise la portance du sol et de bonnes conditions pour les organismes vivants et leurs activités d'agrégation de grumeaux.

#### 4.1.6. *Éviter la pollution des sols*

Contre la pollution atmosphérique, l'agriculteur peut difficilement se prémunir autrement qu'en choisissant de ne pas s'établir à proximité d'une zone exposée. Malheureusement, on constate au contraire une forte progression de l'agriculture urbaine et péri-urbaine (25 à 30% de la production aujourd'hui). Les sols urbains sont souvent très contaminés, et il faudra donc surveiller de près la contamination potentielle des produits récoltés dans ces zones de culture.

##### 4.1.6.1. *Adopter des pratiques culturales et phytosanitaires respectueuses de l'environnement*

Les cultures telles que les palmiers à huile, l'hévéa ou encore les cacaoyers, installées pour de nombreuses années, sont souvent concentrées dans l'espace, dans des bassins de production où elles sont dominantes ou en quasi-monoculture. Les bio-agresseurs y rencontrent donc des conditions particulièrement stables et favorables. C'est aussi vrai en bonne partie pour les cultures maraîchères car souvent ce sont les mêmes cultures qui couvrent les sols au même moment (ex: tomate, oignons, choux, etc.).

L'emploi répété des mêmes pesticides pour contrôler ces infestations favorise ensuite l'apparition et le développement de populations résistantes à ces pesticides, et conduit la disparition des antagonistes naturels, entraînant des traitements répétés (cercle vicieux des pesticides).

En ayant une meilleure connaissance de la parcelle, de la variété cultivée, des risques et des besoins de la plante aux différents stades de développement, des auxiliaires et des problèmes phytosanitaires potentiels, on peut adapter l'intensité du traitement au cycle de développement et distribution spatiale du ravageur ou effectuer des traitements de précision (taches de mauvaises herbes, foyers de maladies) ou choisir des substances actives sélectives et moins persistantes. On arrive ainsi à **réduire la fréquence des traitements** (réduire l'IFT ou Indice de Fréquence de Traitement) **et les doses appliquées par unité de surface**.



Pour réduire la pression des pesticides chimiques sur les sols, il faut recourir à la lutte intégrée et, dans la mesure du possible, privilégier les biopesticides (agents de biocontrôles) et les techniques de lutte biologiques<sup>46</sup> comme :

- la lutte par introduction-acclimatation au moyen de lâchers, massifs (lutte inondative) ou en petite quantité (lutte inoculative) d'un ennemi du bioagresseur ;
- la manipulation environnementale qui vise à favoriser les ennemis du bioagresseur naturellement présents (auxiliaires).

#### 4.1.6.2. *Intercepter les flux polluants à l'échelle de l'exploitation*<sup>47</sup>

Les principaux modes de dispersion des pesticides et leurs résidus sont la dérive des gouttes au moment de l'application, l'infiltration (dans le sol ou dans les eaux souterraines), le ruissellement vers les eaux de surface. La diffusion sous l'effet du vent a pour effet de contaminer la surface de la zone proche du site. La diffusion par infiltration entraîne une contamination du sol au-dessous du site d'entreposage ; elle peut provoquer la contamination des eaux souterraines et, si la diffusion se poursuit, la contamination des eaux de surface (par exemple des lacs et des cours d'eau).

Ces flux polluants peuvent être limités par le strict respect des « Bonnes Pratiques Phytosanitaires » (BPP), l'emploi de buses anti-dérive, le respect de zones non traitées (ZNT), l'installation d'aménagements (bandes enherbées) qui vont favoriser l'infiltration des eaux résiduels de pulvérisation. Des « zones tampons », constituées de bandes enherbées (ou boisées), peuvent être installées pour protéger les eaux de surface (on les installe le long des rivières, des oueds, des mares, etc.). Elles sont d'efficacité très variable (de très faible à près de 100% d'interception des pesticides.

#### 4.1.6.3. *Contrôler les produits polluants à la ferme*

Il est possible de gérer les produits polluants (hydrocarbures, huiles, pesticides, engrais chimiques, biocides,...) grâce à un stockage rationnel, dans un local bien aménagé (avec une cuvette de rétention pour éviter les fuites extérieures). L'agriculteur doit être capable de gérer ses déchets et ses effluents (ex : fonds de cuve) adéquatement.

Les déchets dangereux ne doivent pas être brûlés ni surtout enterrés dans le sol, à la ferme.

46 Voir aussi COLEACP, Manuel de formation « Fondements de la protection des cultures ».

47 Idem.

## 4.2. RESTAURER LA FERTILITÉ DES SOLS

Nous avons vu le rôle clé que joue la matière organique dans le sol. Par conséquent, toutes les techniques qui ont pour objectif d'améliorer ou de préserver la fertilité d'un sol ont un point en commun : avant tout, **l'enrichissement du sol en matière organique !**

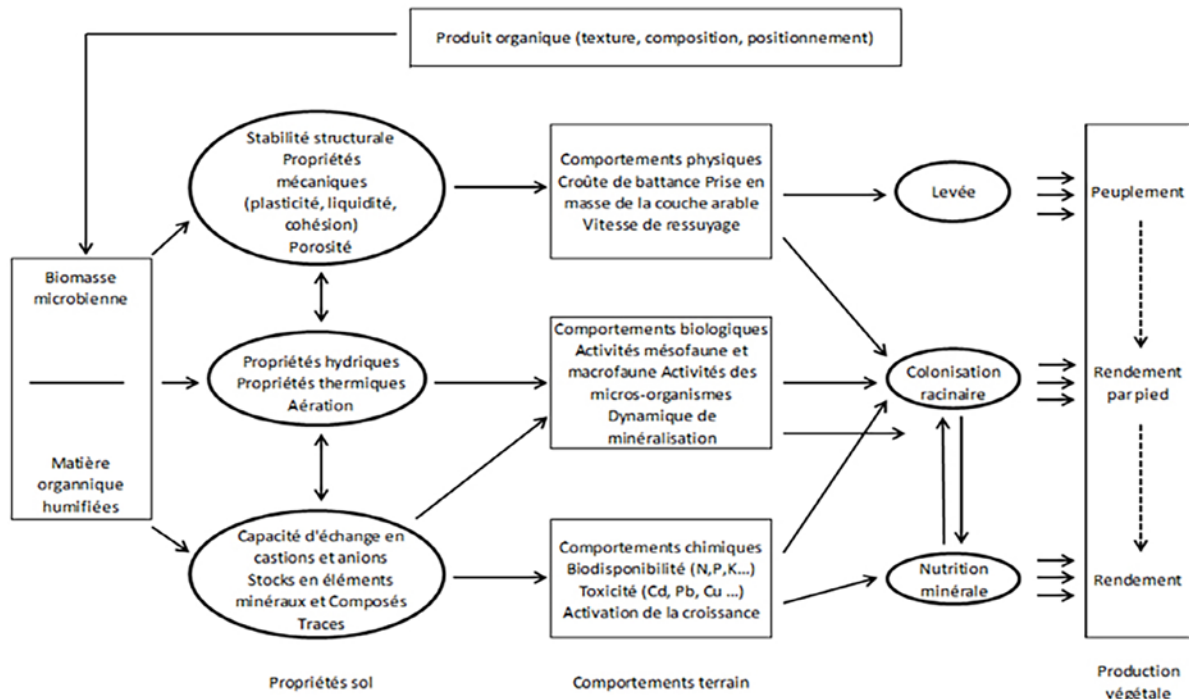


Figure 11 - Effets bénéfiques potentiels d'un produit organique sur le sol et les cultures (Source : ACTA, 2000).

### 4.2.1. Le paillage du sol

Le paillage consiste à recouvrir toute ou partie d'une parcelle de terre dégradée avec de la matière organique<sup>48</sup>, comme par exemple des résidus de plantes, de la paille, des écorces d'arbres, des fanes ou des feuilles d'arbre, dans le but d'une végétalisation et d'une reconstitution du sol par le maintien de l'humidité et le développement d'une activité biologique (source de carbone).

Les objectifs du paillage sont multiples (van Schöll, 1998) :

- une **stimulation des organismes du sol** (apport de **matière organique digestible**) ;
- une protection du sol de l'érosion hydrique et éolienne et de la déshydratation ;
- une amélioration de l'infiltration ;
- une augmentation du niveau d'humidité dans le sol.

<sup>48</sup> Un paillage avec d'autres matériaux (ex : du plastique ou des graviers) est possible, mais alors l'objectif est alors essentiellement d'empêcher la croissance des plantes adventices.

En combinaison avec **l'augmentation de l'infiltration**, cela permet de maintenir dans le sol une teneur en humidité supérieure à celle des sols dépourvus de couche de paillis (Dapola Da, 2008). L'incidence du paillage sur de la **réduction de l'évaporation de l'eau du sol** est depuis longtemps admise. Depuis, de nombreux matériels végétaux ont été étudiés pour évaluer leur efficacité éventuelle comme paillis. L'efficacité du paillage contre l'évaporation dépend essentiellement de son épaisseur. Plus le paillis est épais, plus l'évaporation diminue. Grâce au paillage, les plantes souffriront donc moins vite du manque d'eau pendant la saison sèche (Unger, 1989).

Des études réalisées sur le travail minimum du sol ont révélé **qu'une couverture de litière réduit fortement les températures extrêmement élevées de surface**. Un sol nu dans les régions tropicales peut atteindre des températures très élevées pendant la journée (parfois 50°C). Il a été prouvé que les températures élevées nuisent à la croissance des cultures (CTA, 1995). Une couche de paillis assure une protection du sol contre le soleil et fait baisser la température pendant la journée, ce qui est propice à la germination des semences et à la croissance des racines et des micro-organismes (van Schöll, 1998).



Figure 12 - Exemples de mulch en bananiers et en maïs (Source : FAO)

Les résidus de cultures tels que la paille, tiges de maïs, feuilles de bananiers ou de palmes, peuvent être utilisés comme mulch. Il faudra toutefois **être attentif à ne pas favoriser la conservation ou la dissémination de certaines maladies fongiques par le mulch**. Il en est ainsi pour la cercosporiose noire (ou sigatoka noir), une maladie

foliaire du bananier. Si les feuilles infestées ne peuvent être enlevées de la plantation, elles pourront être disposées au sol mais en prenant soin de les mettre les unes sur les autres (la face supérieure des feuilles vers le sol) afin de limiter l'émission et la dispersion des ascospores qui sont responsables, par l'intermédiaire du vent et de la pluie, de la dissémination de la maladie à courte distance – d'un plant à l'autre – et à longue distance – d'une parcelle à l'autre.

Les matériaux provenant de haies, doivent être réduits en morceaux de moins de 10 cm. Disposer les résidus à la surface du sol et recouvrez-les d'une mince couche de terre afin d'éviter qu'ils ne soient emportés par le vent. Si l'on veut semer ou planter une culture, on pousse de côté le mulch et on met les semences ou les plantules dans le sol.

L'installation de mulch doit se faire en couches pas trop épaisses pour éviter la fermentation et donc le développement de hautes températures.

Dans les régions tropicales, on veillera à privilégier un mélange de végétaux à décomposition lente pour garder le sol le plus longtemps possible couvert. L'installation de haies à feuilles semper virens peut permettre sous ces climats de protéger les cultures du feu.

#### 4.2.2. La pratique des cultures associées

Les cultures associées peuvent être définies comme **la culture simultanée d'au moins deux cultures sur une même parcelle** durant une phase significative de leur croissance, mais sans nécessairement être semées ou récoltées en même temps (Vandermeer, 1989 et Willey, 1979 cités par Ndzana Abanda, 2012).

Il existe différents modèles de cultures associatives :

- Les **cultures mélangées** («mixed cropping») : les différentes cultures sont semées ensemble.
- Les **cultures intercalées** («intercropping») : les différentes cultures sont semées en lignes intercalées. Par exemple, le manioc est semé comme culture secondaires entre les lignes de bananiers. Les tubercules tels que Colocasia ou Xanthosoma, peuvent être cultivés sous bananiers.
- Les **cultures-relais** («relaying-cropping») : la culture secondaire est semée après que la culture principale a été récoltée. Par exemple, le sorgho et le pois (*Cajus cajan*), en Inde, sont souvent cultivés ensemble. Après la récolte du sorgho, les fèves du pois poussent à travers les chaumes du sorgho.

Ce système présente l'inconvénient de donner lieu à une compétition interspécifique pour la lumière, l'eau et les nutriments. Il contribue significativement à l'épuisement rapide du sol. Toutefois, l'association culturale permet l'obtention d'une multitude d'agro-ressources en peu de temps sur un même espace. Elle peut donner lieu à une culture intercalaire si les espèces sont installées suivant un ordre spécifique.

Bien conduite, elle peut engendrer une amélioration de la fertilité car de nombreuses plantes peuvent être associées au regard de **leurs besoins complémentaires**. Elle peut donc être **favorable** et jouer un rôle particulier, tel que la protection contre les ravageurs et maladies. Ainsi l'association maïs-haricot (ou pois) présente deux



effets bénéfiques : le maïs devient tuteur du haricot et le haricot apporte de l'azote au maïs. Autre exemple : la mouche de l'oignon est repoussée par les carottes car leur odeur repousse les mouches. Les carottes sont également utiles à planter entre les rangs de céleri pour lutter contre la teigne du poireau. L'association peut aussi être **neutre** (pas d'effet bénéfique supplémentaire attendu), et quelque fois l'association est au contraire défavorable et à éviter (tableau 2).

Tableau 2 : Quelques exemples d'associations intéressantes de différentes plantes.

Espèce cultivée	Culture associée	Association favorable	Association défavorable
Ail	Tomate, carotte, épinard	Arbres fruitiers	Haricot, pois
Asperge	Tomate, piment	Non connue	Non connue
Aubergine	Haricot, laitue, oignon	Ail	Tomate, carotte
Carotte	Haricot, choux, poivron	Romarin	Betterave
Céleri	Haricot, poireau, ail, choux	Epinard	Pomme de terre, maïs
Choux	Haricot, concombre	Céleri, romarin	Ail, oignon
Concombre	Choux, pois, maïs	Non connue	Non connue

Les cultures associées sont pratiquées dans les régions tropicales en toutes conditions géo pédoclimatiques. Les principales raisons de cette association sont les suivantes :

- **Mieux profiter de l'azote (N)** puisé dans l'air par les espèces appartenant à la famille des légumineuses (haricot, pois, fève, trèfle,...) et qui est libéré dans le sol au fur et à mesure de la décomposition des racines. De plus, quand les bactéries fixatrices de l'azote (*Rhizobium*) sont présentes dans le sol, **la symbiose** entre les légumineuses et ces bactéries fixatrices d'azote confère aux plantes l'accès à une source en azote inépuisable et ainsi leur permet de disposer d'un avantage sur les espèces dépendant uniquement de l'azote du sol. Les bactéries fixatrices d'azote font en effet bénéficier la plante d'azote d'origine atmosphérique en échange de carbone provenant de la photosynthèse.
- **Bénéficiaire de l'effet protecteur** (face aux maladies et ravageurs). Dans les cultures associées, on veillera à ne cultiver ensemble que des espèces qui se stimulent mutuellement ou qui au moins ne se gênent pas! Grâce à l'association de culture, il est possible d'améliorer la performance agronomique en réduisant par exemple la prolifération des adventices et les attaques par les maladies (Hauggaard *et al.*, 2009 cités par Shili, 2009) et certains ravageurs (ex: nématodes des racines).
- **Mieux utiliser le sol qui sera dès lors plus productif.** Les différents travaux d'expérimentation menés sur l'étude du fonctionnement des associations de cultures montrent qu'en général il y a une meilleure valorisation des ressources du milieu en cas d'associations par rapport aux cultures pures, conduisant à une productivité supérieure (Hauggaard *et al.*, 2009 cités par Shili, 2009).



### 4.2.3. L'apport de matière organique sur la parcelle

Ajouter de la matière organique au sol est le moyen le plus efficace d'en augmenter la qualité. La matière organique doit être considérée non seulement comme un fertilisant, mais aussi - et surtout peut-être ! - comme un amendement du sol.

L'apport au sol peut être fait de différentes manières, notamment par l'utilisation de composts, de plantes de couverture, tant vivantes que mortes, ainsi que de cultures d'engrais verts. La matière organique est donc apportée sous diverses formes, fraîche ou évoluée (cf. infra, la partie consacrée aux « amendements organiques »).

#### Les composts

L'apport de compost est la manière idéale d'améliorer la qualité du sol, d'augmenter sa richesse en matière organique et d'obtenir les bons équilibres minéraux. La meilleure manière d'atteindre l'équilibre minéral est de définir par une analyse du sol quelles sont les quantités nécessaires à ajouter forme de minéraux broyés, comme du phosphate naturel, du basalte broyé, du sulfate de potassium, du gypse, etc., à la matière à composter au moment de démarrer un tas de compost. Les processus biologiques qui forment le compost rendront ces minéraux facilement disponibles pour les plantes sous des formes à libération rapide et lente. Le compost résultant, riche en minéraux, est répandu sur les cultures. Les quantités à épandre peuvent varier en moyenne de 10 à 20 t/ha.

On peut aussi appliquer périodiquement des oligo-éléments mélangés à de la mélasse et/ou des amendements microbiens infusés pendant plusieurs jours pour les rendre biodisponibles. Ils peuvent être pulvérisés sur les champs, le pulvérisateur assurant une répartition homogène sur l'ensemble du champ. Le but est que la plupart des nutriments pénètrent dans le sol. Ce système garantit que l'activité biologique du sol libère une quantité constante de tous les nutriments nécessaires pour la culture et permet d'obtenir un bon rendement. La nature exhaustive du programme de nutrition garantit l'absence de carences.

#### Les engrais verts

C'est une culture réalisée dans le seul but d'améliorer la fertilité du sol, mais des effets autres peuvent être obtenus comme la lutte contre l'érosion. Ces plantes de couverture de sol sont aussi efficaces pour le désherbage (effet de concurrence) et la couverture du sol par ces plantes est un facteur déterminant dans la réduction du ruissellement. Ainsi, la protection de la surface du sol assurée par une litière ou un couvert végétal bien développé permet de diminuer l'érosion, les pertes d'eau par ruissellement et de ralentir l'évolution des croûtes. Il faudrait donc favoriser l'implantation rapide des cultures et le développement d'une biomasse apte à intercepter efficacement la pluie.

On utilise comme « engrais verts » des plantes à croissance rapide qui stockent des quantités importantes d'éléments minéraux dans des tissus jeunes. Avant l'installation de la culture suivante, l'engrais vert peut être enfoui par un travail du sol ou laissé en mulch<sup>49</sup> à la surface.

<sup>49</sup> Le « mulch » est un produit végétal que l'on étale sur le sol au pied des végétaux pour enrichir la terre en se décomposant. De plus, il empêche la pousse des mauvaises herbes et préserver l'humidité du sol.

Plusieurs espèces de légumineuses annuelles à graines non comestibles comme le pois mascate (*Mucuna pruriens* var *utilis*), le Kudzu (*Puerovia phaseoloides*) ou le lablab (*Lablab purpureus* L.) sont utilisées comme plante de couverture pour le contrôle de l'érosion hydrique, la lutte contre les adventices et la restauration de la fertilité du sol. Outre les légumineuses, le tithonia (ou tournesol Mexicain communément appelé au Cameroun « fleur jalousie ») est également très apprécié.

Des études menées en Afrique ont montré que l'incorporation dans le sol du mulch provenant de la croissance rapide des **légumineuses pérennes** comme le leucaena (*Leucaena* sp.), le cajan (*Cajanus cajan* L.), le sesbania (*Sesbania sesban* M.) ou le glyricidia (*Glyricidia sepium*) ont apporté une amélioration significative de la fertilité du sol.

Les engrais verts ont l'avantage de prélever les éléments assimilables disponibles dans le sol et de les stocker dans la biomasse dans l'attente de la culture suivante. Ils peuvent ainsi éviter les pertes (surtout d'azote) **par lessivage et la pollution de la nappe phréatique** (moins de nitrates dans les eaux souterraines).

La minéralisation de l'engrais vert est rapide car il est constitué de tissus jeunes, et il libère des éléments minéraux pour la culture suivante. La minéralisation de la matière organique fraîche est presque complète et l'on admet habituellement que l'engrais vert a **des effets positifs rapides sur la nutrition mais peu d'effets directs durables sur la teneur en matières organiques** du sol.

### *Les engrais verts améliorent le rendement*

Une large méta-analyse réalisée à l'échelle du continent africain par le *World Agroforestry Centre* (Sileshi *et al.*, 2008) a montré que les engrais verts amélioraient significativement le rendement (ex : du maïs), soit seuls, soit avec de petites quantités d'engrais minéral :

1. Les engrais verts ont des **effets synergétiques** avec les engrais minéraux et donnent des **rendements acceptables** avec des dépenses relativement modestes sur les importations d'engrais.
2. Les engrais verts **réduisent le risque de production** en stabilisant le rendement comparativement à la culture n'ayant pas reçu d'engrais ou le maïs cultivé après des jachères traditionnelles.
3. Les engrais verts donnent de bons résultats là où on en a le plus besoin, sur des terres à potentiel faible ou moyen, ce qui convient typiquement aux agriculteurs pauvres incapables de se procurer des engrais minéraux.

Ainsi, selon cette étude, le maïs cultivé avec les engrais verts a significativement produit plus de graines que le maïs cultivé sans engrais ce qui est de facto la pratique des agriculteurs de subsistance ou le maïs cultivé après une jachère traditionnelle. Les engrais verts ont augmenté le rendement moyen jusqu'à 1,6 tonnes à l'hectare suite aux pratiques des agriculteurs petits fermiers. Le rendement du maïs était plus stable dans les champs utilisant de l'engrais vert que dans les champs non fertilisés ou dans les champs cultivés de maïs après des jachères traditionnelles ; néanmoins ce rendement n'était pas aussi important que celui des champs ayant reçus de l'engrais minéral. En rapport avec le rendement du maïs le risque de production est ainsi plus bas dans les champs utilisant de l'engrais vert que dans ceux soumis aux pratiques des agriculteurs. Enfin, le rendement du maïs a augmenté de plus de 30% quand les parcelles d'engrais verts avaient reçu un amendement d'engrais minéral de moitié la dose recommandée, comparé aux parcelles similaires qui n'avaient pas reçu d'amendement. De grandes augmentations en rendement de maïs ont été enregistrées en utilisant des engrais verts sur des sites à potentiel moindre à moyen que sur ceux à potentiel élevé.



### **Les fumiers**

- ***L'intérêt des fumiers comme amendements***

Parmi les effluents d'élevage, **seuls les fumiers sont des amendements organiques**. Les purins (liquide s'écoulant des litières) et les lisiers (mélange d'excréments solides, d'urine, d'eau) s'apparentent plutôt aux engrais organiques. En effet, ils sont **rapidement minéralisés** et leur rôle principal n'est pas d'améliorer la structure du sol mais d'apporter des éléments nutritifs.

Au cours de leur maturation (qui peut durer plusieurs mois), les déjections animales, naturellement, perdent une partie de leurs éléments. Les pertes carbonées sont inéluctables, mais en même temps nécessaire à la bonne santé des bactéries qui

utilisent ces matières organiques. Plus grave, ce sont **les pertes azotées sous forme d'ammoniac gazeux**. Ces pertes, difficiles à empêcher à l'étable, sont **facilement contrôlables quand le fumier est bien tassé lors de sa mise en tas**. Quant à la potasse dont les pertes peuvent s'avérer catastrophiques, il est facile de les éviter en recueillant, avec soin, les jus qui s'écoulent des tas et de limiter ces écoulements en protégeant les tas du lessivage par les pluies. Bien entendu, **les tas de fumier ne devront jamais être installés directement sur le sol, mais sur des plates-formes étanches**.

L'obtention d'un bon fumier **commence dès l'étable** dans laquelle on doit veiller à ce que la litière, bien humidifiée par les urines, soit la plus tassée possible pour que s'y installent des conditions d'anaérobiose, garantes de moins de pertes carbonées, en potasse et en azote. La technique de stabulation libre pourrait offrir de bonnes conditions si les aires de stabulation sont fortement paillées, ce qui n'est pas souvent le cas.

La composition des fumiers dépend de plusieurs facteurs parmi lesquels on retiendra **l'espèce animale, son alimentation** surtout minérale, le **type de paille** avec laquelle les déjections sont mélangées et l'état d'évolution du produit (fermentation du fumier). Les quantités à épandre peuvent varier de 20 à 50 t/ha pour les fumiers de bovins et de 3 à 10 t/ha pour les fumiers de volailles. Les caractéristiques physiques des fumiers et composts (teneur en matière sèche, densité, cohésion et frottement interne) varient beaucoup d'un produit à l'autre. Les fumiers de bovins, d'ovins, de porcins, de caprins ou d'équins sont le plus souvent **déficitaires en phosphate**. Par contre, les fumiers de volailles sont très riches en azote, en phosphore et en potassium. Outre les éléments fertilisants majeurs, ces produits apportent aussi des quantités non négligeables d'autres éléments (soufre, sodium, oligoéléments). À noter que les effluents de volailles (leurs fumiers et fientes) sont généralement considérés comme des «fumiers mous», à action rapide; ils n'ont pas les mêmes qualités.

Parce que les fumiers sont carencés en phosphore, les paysans devraient les compléter en **traitant les litières**, par exemple, **avec des phosphates de calcium** (phosphates naturels ou maërl). Outre la supplémentation souhaitée, les phosphates et le calcium désodorisent fortement la litière, permettent d'éviter la prolifération de bon nombre de bactéries indésirables et vectrices de maladies comme les mammites, le fourchet, des diarrhées, des septicémies, etc. Enfin, pour être intéressants, **les fumiers doivent être compostés** et incorporés au sol à la bonne période.



Figure 13 - Un tas de fumier : comme souvent les tas sont mal compactés.

De plus, un tas de fumier ne doit jamais être installé directement sur le sol. Malheureusement, **les fumiers sont souvent mal préparés et mal utilisés** par les agriculteurs.

- ***Préparation des fumiers par compostage***

Le mode de compostage le plus fréquent du fumier est le **compostage en tas et en surface**. Ce type de compostage doit faire passer les matières organiques maintenues en anaérobiose à une situation de décomposition micro-aérobie. Ces conditions obligent les bactéries à respirer une partie des molécules intermédiaires qu'elles auront fabriquées. Ces conditions permettent de récupérer l'ammoniac, l'azote uréique et divers autres composés qui sont réincorporés aux organismes bactériens, et ainsi ne sont plus perdus. D'autres éléments sont aussi mieux conservés dans ces conditions comme le phosphore ou le soufre.

Le **compostage en tas** du fumier s'accompagne d'une forte élévation de la température à cœur. Cette forte température a pour effet d'éliminer un bon nombre de microorganismes indésirables ou pathogènes et de mauvaises graines. En outre, il semblerait que l'humification à chaud soit plus intense que l'humification à froid. Au bout d'environ quinze jours, le fumier a perdu son odeur. Cela veut dire que l'on a à faire à un compost jeune qui pourrait être déjà utilisé, mais il vaut mieux utiliser un compost plus mûr, c'est-à-dire un compost âgé de deux à trois mois.



Le **compostage en surface ou au sol**, consiste à épandre du fumier frais ou un compost jeune, sous forme pulvérisée, sur le sol nu ou mieux, sur des engrais verts ou des prairies. Cette technique présente divers avantages par rapport au compostage en tas. On constate, par exemple, que cette technique stimule intensément les bactéries du sol et particulièrement les *Azotobacter* (genre de bactéries libres du sol, aérobies et capables de fixer l'azote de manière non symbiotique, c'est-à-dire sans devoir être fixées aux racines des plantes par exemple dans des nodosités). Ces derniers, par leur action fixatrice de l'azote atmosphérique, compensent très largement les pertes azotées, lesquelles sont générées de manière plus importante par le compostage au sol que par le compostage en tas.

- **Utilisation des fumiers**

Les fumiers sont encore **trop souvent mal utilisés**. L'idée selon laquelle les fumiers enfouis rapidement se décomposeront plus vite et que les éléments libérés seront utilisés par les plantes, perdure encore chez bon nombre de paysans. Pourtant la plupart d'entre eux disposent des outils de dispersion des fumiers en surface, mais bien souvent, **le temps qui sépare le moment où ils procèdent à l'épandage du fumier et le moment où ils travaillent la terre et procèdent à son enfouissement est trop court** (un intervalle de plusieurs semaines, voire de plusieurs mois, est conseillé, selon la maturité et la composition du fumier, la température moyenne et la pluviométrie). Pour que l'intégration au sol soit plus rapide, on peut effectuer un léger griffage pour mélanger le fumier à la couche superficielle du sol (cela accélèrera sa maturation). Dès, qu'au bout de quelques semaines, on ne peut plus distinguer la nature des matières de départ (ex : la paille), on pourra travailler le sol et enfouir le fumier plus profondément. Il est préférable d'éviter d'épandre les fumiers juste avant le semis de certaines cultures (ex : un maïs).

### Les lisiers et purins

Bien que les urines animales soient d'excellents précurseurs à la fertilisation, elles sont souvent très **mal utilisées** et **posent davantage de problèmes qu'elles n'en solutionnent**. D'abord les urines sont très pauvres en phosphore et en calcium. En outre, **les urines sont considérées acidifiantes** (mais le problème vient essentiellement d'une mauvaise gestion de l'azote). Cette acidification est rapidement fatale aux bactéries du sol et aux *Azotobacter*.

Faute d'être mélangées avec de la paille ou d'autres débris végétaux, sources de cellulose indispensables aux bactéries, **les urines seules ne stimulent pas la vie bactérienne dans les sols**. Enfin, l'incorporation des urines dans le sol conduit à des **pertes énormes en azote** sous forme d'ammoniac, ainsi que des pertes importantes en potasse. C'est pourquoi il est préférable de ne pas les épandre sur les terres tels quels. Si on décide de les épandre malgré tout, la moins mauvaise façon de préparer les lisiers et les purins, ce serait de **les oxygéner** pour maintenir une activité aérobie dans les fosses de stockage, de **les compléter en phosphates** et de **les diluer**. Enfin, comme pour tous les engrais azotés qui risquent de polluer les eaux, l'épandage respecter au moins de 6 m de distance par rapport aux cours d'eau, étangs ou autres eaux de surface.

#### 4.2.4. La pratique de la jachère

La jachère dite « jachère naturelle » est pratiquée par les agriculteurs depuis des temps immoraux. Elle consiste à **interrompre momentanément la culture d'un champ** ou d'une partie d'un champ pendant quelques mois ou quelques années dans le but de favoriser la restauration de la fertilité du sol.

La jachère dite « améliorée » est **un système rotatif** dans lequel des espèces d'arbres ou d'arbustes judicieusement choisies sont utilisées comme espèces de jachère en rotation avec les cultures dans le but d'améliorer la fertilité du sol ou de produire des biens économiques. Le principe de la jachère améliorée consiste à **planter en association avec les cultures vivrières des espèces d'arbres ou d'arbustes améliorants** qui sont généralement des légumineuses à croissance rapide. Après la récolte des cultures vivrières, les espèces améliorantes ou légumineuses sont laissées en champs pendant la période de jachère. Pendant cette période de jachère, les arbres ou les arbustes utilisent leur important système racinaire pour absorber de grandes quantités d'éléments nutritifs dans les couches inférieures du sol en même temps qu'ils fixent l'azote atmosphérique. Ces éléments nutritifs puisés dans les couches profondes du sol et dans l'atmosphère retournent ensuite à la surface du sol et améliorent la fertilité du sol à travers la chute des feuilles, la décomposition des racines et des branches.

On distingue jachère améliorée « arbustive » et « arborée » (source : [www.worldagroforestry.org](http://www.worldagroforestry.org)).

##### La jachère améliorée arbustive

C'est une jachère naturelle dans laquelle une ou plusieurs espèces d'arbustes à croissance rapide et fixatrices d'azote ont été introduites (ex : *Cajanus cajan*, *Sesbania sesban*, *Tephrosia spp.*) **en vue d'accélérer la restauration de la fertilité du sol**, de **réduire la période jachère** et d'améliorer la production des cultures annuelles. En plus d'améliorer la fertilité, ces plantes rendent aussi un certain nombre de services écosystémiques non négligeables pour les populations (lutte contre l'érosion, plantes médicinales, bois de chauffage, nourriture, fourrage,...).

**Prenons l'exemple du Cajan.** L'introduction du *Cajanus cajan* dans un champ de maïs n'entraîne pas de travail d'entretien supplémentaire. Les seules opérations d'entretien nécessaires sont le sarclage et le buttage qui sont habituellement effectuées par les paysans dans leurs champs de maïs. Pendant la période de jachère, c'est-à-dire après la récolte du maïs, les tiges de cajan restées en champ ne nécessitent aucun entretien. Après la récolte du maïs, le cajan est laissé en champ où il continue son développement jusqu'à la fructification. Les gousses du cajan sont récoltées lorsque les graines ont atteint leur maturité physiologique, c'est-à-dire lorsque les graines sont mûres.

On reconnaît que les graines sont mûres lorsque les cosses commencent à perdre leur couleur verte. Il est conseillé de récolter les graines au fur et à mesure qu'elles atteignent leur maturité physiologique. Lorsque les gousses sèchent en champ, elles éclatent et laissent tomber les graines, ce qui rend la récolte très difficile et occasionne beaucoup de perte.

Après la récolte des graines de cajan, c'est-à-dire à la fin de la période de jachère, les tiges de cajan sont coupées (zone de forêt) ou arrachées (zone de savane humide). Ces tiges sont ensuite étalées dans le champ. Lorsque toutes les feuilles sont tombées sous l'effet du soleil, les tiges sont ramassées et entassées. Le champ peut alors être cultivé en prenant soin d'incorporer toutes les feuilles au sol. Les tiges de cajan entassées peuvent être utilisées comme bois de chauffage. Elles peuvent aussi être brûlées sur place et la cendre utilisée pour fertiliser le champ.



Photo 14 - *Cajanus cajan*, pois d'Angole ou pois de pigeon (Source : ILRI)

### La jachère améliorée arborée

C'est une jachère naturelle dans laquelle une ou plusieurs espèces d'arbres fixateurs d'azote ou non, ont été introduites dans le but d'accélérer la restauration de la fertilité du sol, de **lutter contre l'érosion et/ou d'obtenir divers produits** (fruits, fourrage, bois etc.).

**Prenons l'exemple du Calliandra** (*Calliandra calothyrsus*), un petit arbre fixateur d'azote, originaire de l'Amérique Centrale et du Mexique. Il a été introduit en Indonésie pour créer de l'ombrage au café, mais l'arbre s'est confirmé plus intéressant pour d'autres utilisations telles que le fourrage, le bois de feu et pour restaurer la fertilité du sol. Les émondages de Calliandra sont utilisés pour nourrir le **bétail** et il constitue aussi une bonne source de miel. Les cultures vivrières sont plantées dans des



couloirs entre les lignes. L'écartement peut être adapté aux conditions locales, mais il faut tenir compte du fait que l'efficacité de *Calliandra* pour fertiliser le sol diminue quand l'espacement augmente.



Photo 15 - *Calliandra calothyrsus* et exemple de plantation dans une jachère arborée.

#### 4.2.5. Les techniques de dépollution des sols

Il existe malheureusement très peu de techniques, autres que l'extraction de la masse polluée, de dépollution des sols. Heureusement, pour les composés organiques les microbes du sol peuvent « digérer » les molécules à condition qu'elles soient biodisponibles et non pas adsorbées au sol (on parle de **bioremédiation**), et pour les métaux lourds, certaines plantes peuvent les extraire du sol et les concentrer (on parle alors de **phytoREMÉDIATION**).

##### 4.2.5.1. La bioremédiation

La bioremédiation est une technique consistant à **augmenter/accélérer la biodégradation** ou la biotransformation, en inoculant des micro-organismes spécifiques (bioaugmentation) ou, de préférence, en stimulant l'activité de populations microbiennes indigènes (essentiellement des bactéries) par apport de nutriments et par ajustement des conditions de milieu (air, température, sources de carbone et d'azote, humidité, pH, etc.)

La bioremédiation est utilisée pour **dépolluer un site naturel** (sol, sédiments, eaux de surface ou souterraines)<sup>50</sup>, en faisant appel à l'utilisation de micro-organismes, de champignons, de végétaux divers ou d'enzymes qu'ils produisent. Les moyens mis en œuvre sont donc respectueux de l'environnement et de la santé humaine. Ces organismes sont notamment utilisés pour dégrader les nitrates et les phosphates, pour combattre des marées noires, pour dégrader l'amiante, pour réduire la propagation de métaux lourds dans divers milieux humides ou encore

50 Cette technique a aussi été présentée pour traiter les fonds de cuve, les eaux contaminées par les pesticides (biofiltres, biobeds, etc. dans le Manuel « Fondements de la protection des cultures, Chapitre 10, du COLEACP. Le fonctionnement des biofiltres y est exposé en détails.

pour dégrader les résidus de pesticides présents dans les eaux et dans les sols.

#### 4.2.5.2. La phytoremédiation

Certaines plantes sont en effet connues pour leur capacité à **absorber des métaux lourds** (ex : plomb, cadmium, arsenic, cuivre, zinc,...) par leur système racinaire (certaines les captent dans l'air par leurs feuilles). Dans certains cas, les polluants sont uniquement neutralisés, mais dans d'autres situations, ils peuvent être rendus aisément extractibles. Au cours d'un processus de « *phytoremédiation* », les plantes agissent sur le polluant et leur action intervient à différents niveaux (on parle donc aussi de « *phyto-dépollution* »). Les polluants peuvent être stabilisés ou dégradés dans la rhizosphère, **séquestrés ou dégradés** ou encore **rendus volatiles** et **éliminés** dans l'air environnant.

Les plantes envisagées pour la dépollution doivent avoir **une croissance rapide, une forte production de biomasse et être compétitives** vis-à-vis des plantes endogènes du site, elles doivent aussi être **tolérantes à la pollution** pour permettre une extraction optimum du polluant. Les plantes seront choisies en fonction de leurs propriétés (densité du couvert racinaire) en relation avec le type de mécanisme envisagé pour dépolluer.

**Quatre mécanismes** principaux sont mis en œuvre en fonction de la nature du polluant et de ses caractéristiques physico-chimiques (figure 16) : (1) la phyto-extraction ; (2) la phyto-dégradation et la phyto-séquestration ; (3) la rhizo-dégradation ou bio-stimulation ; (4) la phyto-stabilisation.

#### Phyto-extraction

Ce mécanisme est basé sur la capacité des plantes à extraire et accumuler des polluants présents dans les sols. Il en résulte une absorption et une accumulation des polluants dans les tissus aériens sans impliquer leur dégradation. À la fin de ce processus, il est alors nécessaire de récolter les parties aériennes des plantes. La destruction des polluants peut alors se faire par incinération mais aussi par compostage. Dans le cas d'une phyto-extraction de métaux lourds, les plantes envisagées sont celles qui ont les niveaux d'absorption les plus forts, de translocation et d'accumulation dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltés. On doit privilégier les plantes ayant un système racinaire large et dense car elles ont une plus grande capacité d'absorption et elles explorent une plus vaste zone de sol.



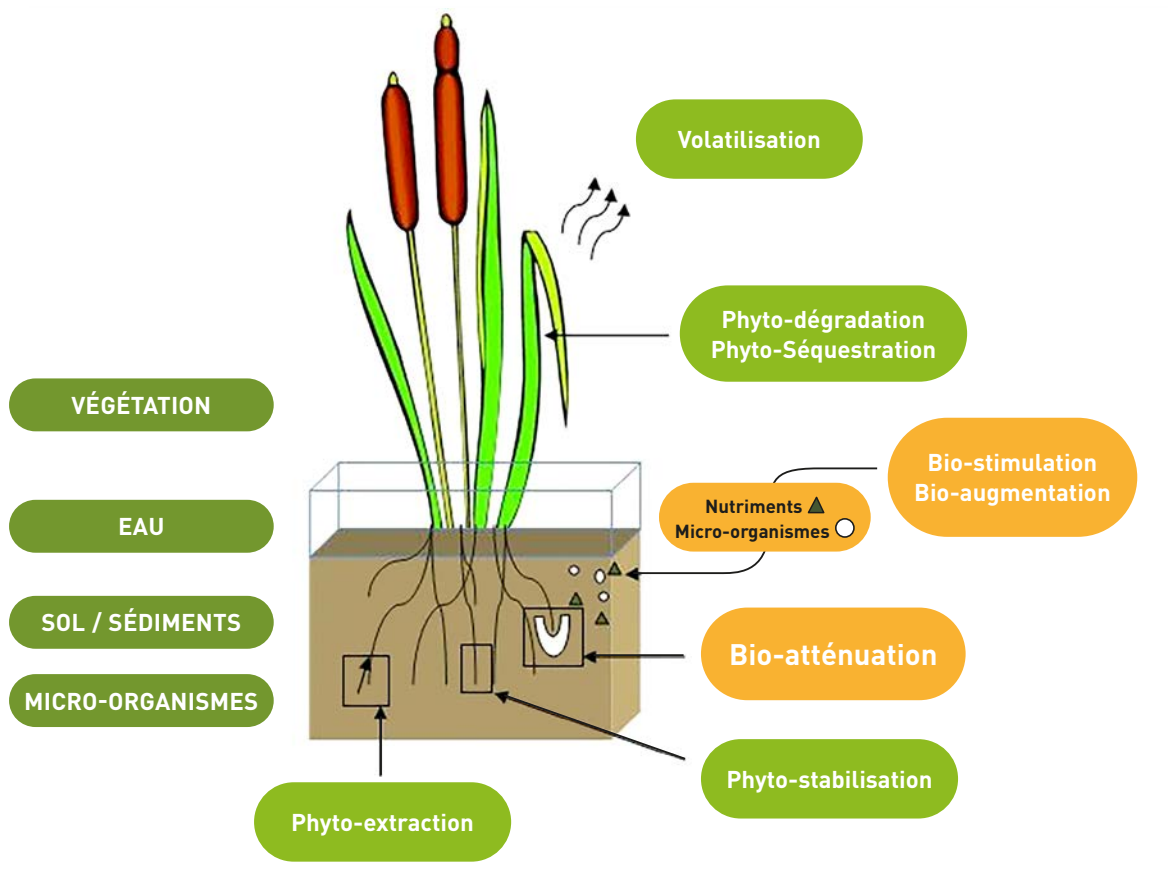


Figure 16 : Différents mécanismes mise en œuvre dans la bioremédiation ou phyto-dépollution

### Phyto-dégradation et phyto-séquestration

Après avoir absorbé un contaminant, certaines plantes peuvent être capables de le dégrader. Exposés à divers xénobiotiques, les végétaux ont dû développer des systèmes de détoxification. Les enzymes impliquées ne sont pas spécifiques des polluants présents, ce sont des enzymes du métabolisme secondaire de la plante. Les enzymes transforment le composé par réduction, oxydation ou hydrolyse créant un ou plusieurs composés endogènes solubles qui sont soit stockés dans la vacuole, soit incorporés dans la lignine ou dans les autres constituants de la paroi cellulaire devenant ainsi non extractibles. Pour un mécanisme basé sur la dégradation par les plantes, il est préférable que les plantes synthétisent de grandes quantités d'enzyme de dégradation.

### Rhizo-dégradation ou bio-stimulation

Dans ce cas, les plantes ont une action indirecte sur le polluant. Elles agissent en activateur de la dégradation microbienne. La rhizosphère, zone de sol à proximité des racines, est une zone de haute densité et d'activité microbiennes. Les plantes peuvent moduler l'environnement géochimique de la rhizosphère ce qui fournit des conditions plus adaptées à la croissance des bactéries et des champignons. Certains composés organiques des exsudats racinaires (phénols, acides organiques, alcools, protéines) peuvent être utilisés comme sources de carbone et d'azote pour la croissance et la survie des micro-organismes. L'activité des micro-organismes

est favorisée par la présence des plantes qui créent un environnement physico-chimique approprié favorisant ainsi la dégradation microbienne des polluants organiques. Cette interaction entre les plantes et les micro-organismes permet de limiter, dans certains cas, l'utilisation de fertilisants au cours de la bio-dépollution grâce aux déchets végétaux et aux exsudats racinaires.

### Phyto-stabilisation

Certains polluants sont récalcitrants aux précédents mécanismes. Dans ce cas, la phyto-stabilisation fournit une alternative au problème de contrôle de la contamination. Elle repose sur **l'immobilisation du polluant** pour limiter sa dispersion dans l'environnement et sa biodisponibilité. Elle peut consister en une simple **revégétalisation du site qui évite l'érosion et la dispersion du contaminant** dans l'air et dans l'eau. Les plantes peuvent aussi être utilisées comme des « pompes organiques » pour absorber de grands volumes d'eau. Bien que le polluant ne pénètre pas dans la plante, il reste alors localisé dans la zone polluée initialement. Cela ne permet pas de diminuer la pollution dans le sol mais cela réduit la migration des contaminants vers les nappes phréatiques. Les racines des plantes ont aussi la capacité de modifier les conditions environnementales comme le pH ou l'humidité du sol. Certains contaminants peuvent être sensibles à ces variations et la présence de plantes peut ainsi permettre diminution de la biodisponibilité du polluant.

#### 4.2.5.3. *La dépollution des sols par le traitement physique, chimique et thermique*

Quelques autres traitements sont théoriquement possibles :

- **les traitements physiques** : utilisent des fluides (eau, gaz), présents dans les sols ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser ;
- **les traitements chimiques** : font appel à des réactifs chimiques pour détruire les polluants, les transporter en des composés moins toxiques et/ou plus facilement biodégradables ou pour modifier leurs caractéristiques ;
- **les traitements thermiques** : utilisent de la chaleur pour détruire le polluant, l'isoler ou le rendre inerte.

Cependant aucun d'eux n'est réellement applicable actuellement pour restaurer la qualité de sols agricoles.

# Chapitre 5

## Étude de cas

5.1. Une étude de cas : pourquoi ? comment ?	234
5.2. Partie 1 : Mise en situation	236
5.3. Partie 2 : Analyse des causes	242
5.4. Partie 3 : Recherches de solutions appropriées	251
5.5. Partie 4 : Plan d'actions	263

## OBJECTIFS PÉDAGOGIQUES

A l'issue de cette étude de cas, l'apprenant sera capable :

- D'analyser une situation proche de la réalité
- De proposer les mesures ou analyses à réaliser pour poser un diagnostic
- De déterminer l'ensemble des causes, directes ou indirectes, d'une perte de fertilité des sols sur base des connaissances théoriques acquises
- De proposer un ensemble de solutions appropriées pour améliorer durablement la fertilité des sols
- D'élaborer un plan d'actions cohérent à mettre en place pour retrouver un niveau acceptable de fertilité et une gestion durable des sols

## 5.1. UNE ÉTUDE DE CAS : POURQUOI ? COMMENT ?

### 5.1.1. Pourquoi une étude de cas ?

Travailler à partir de la description d'un cas théorique ne remplacera jamais votre expérience professionnelle, forgée sur le terrain et au contact de la réalité des producteurs. Cependant, il est possible d'**acquérir à travers un exemple, tiré de situations déjà rencontrées, des principes méthodologiques** pour analyser la situation, déterminer la nature et l'origine de certains problèmes qui peuvent être rencontrés par ces derniers, pouvoir proposer des pistes de solutions qui soient efficaces, rentables et compatibles avec les objectifs de durabilité.

**Voici un exercice pour vous entraîner !**

Une étude de cas ne doit pas servir à proposer une «recette toute faite» dont les ingrédients seraient toujours les mêmes solutions à recommander aux producteurs. Au contraire, elle doit vous permettre de **comprendre la complexité des situations qui peuvent exister et qui nécessite une approche au cas par cas**, avec des solutions appropriées et adaptée à chacune des situations et aux ressources disponibles localement. **Il faut aider le producteur à comprendre le «pourquoi» de ses problèmes et à déterminer lui-même «comment» une amélioration durable de la situation est possible** en faisant la balance coût-bénéfice de chaque solution théoriquement possible.

### 5.1.2. Comment profiter de cette étude de cas pour revoir les divers aspects de la gestion durable de la fertilité des sols et appliquer ce que vous avez retenu à un cas qui pourrait se rencontrer en pratique ?

L'étude de cas comporte **4 parties**, qui sont autant d'étapes dans l'**exercice à réaliser** :

1. **Une mise en situation** : par la lecture d'un texte, il s'agira d'identifier les informations utiles à comprendre une situation que pourrait rencontrer une entreprise horticole (dans le cas présent, en matière de fertilité de ses sols). Pour pouvoir affiner le diagnostic, il faudra éventuellement proposer de réaliser des mesures ou des analyses.
2. **Une analyse de la situation** : pour identifier les causes et proposer des pistes de solutions à l'entreprise, il faudra analyser les données et faire le lien entre pratiques décrites et problèmes rencontrés (nature, origine, interaction entre les observations) et mesurer l'écart existant avec les objectifs de l'entreprise.
3. **Une identification de solutions appropriées** : il s'agira de faire l'inventaire des solutions qui devraient être appropriées pour régler chaque problème identifié séparément; ensuite de voir pour chaque solution si elle est: (1) efficace; (2) rentable; (3) accessible; (4) durable
4. **Une proposition de plan d'actions pour l'entreprise** : il s'agira d'établir une stratégie de mise en œuvre intégrant les solutions retenues, afin d'améliorer durablement la situation : maintenir ou d'améliorer la fertilité des sols.

Pour profiter de cette étude de cas, **vous devez suivre les consignes et réaliser chacune des étapes comme un exercice personnel**, en vous aidant des éléments théoriques contenus dans le manuel, mais aussi en consultant les sites web et les références utiles mentionnées dans ce manuel.

A chaque étape **vous aurez ainsi des consignes, puis un solutionnaire**. Vous verrez donc le message suivant :

*«Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au solutionnaire proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces propositions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche».*

Conseil avant de commencer :  
Imprimez les pages de ce chapitre vous facilitera le travail.





## 5.2. PARTIE 1 : MISE EN SITUATION

Consigne :

*Lisez attentivement cet exposé des difficultés que rencontre une entreprise horticole*

**i**

*Identifiez dans la situation décrite les éléments importants qui vont vous aider à comprendre la nature des problèmes de cette entreprise et les causes probables.*

*Au besoin, imprimez cette page pour la relire plusieurs fois.*

*(Avertissement : il s'agit d'un cas imaginaire, et toute ressemblance avec les situations décrites, les noms propres ou la dénomination de l'entreprise serait purement fortuite).*

### 5.2.1. Exposé du cas

Depuis plus de 10 ans maintenant, suite au décès de son père qui était maraîcher, comme avant lui son grand-père, Dieudonné SHAMBA est le manager de l'entreprise familiale FRUITVERTS sarl. C'est une entreprise de taille moyenne (environ 15 ha) établie en périphérie d'une grande ville et à proximité de quelques villages où sont écoulés toute l'année une bonne part de ses légumes. Cette entreprise produit sur son périmètre certains de ses produits (surtout des haricots verts et des tomates-cerises), mais elle travaille aussi avec les nombreux petits producteurs des environs qui lui fournissent tout au long de l'année des fruits (mangue) et certains légumes (gombo, chou, piments, tomates, amarante,...). Dans sa station de conditionnement, elle trie et emballe les produits destinés au marché régional et d'exportation. Une partie des tomates achetées aux producteurs locaux sont aussi transformées sur place (séchées) et conditionnées. À peine 30 kms séparent l'entreprise de son principal marché local (en ville) et du grand port d'où sont expédiés ses produits de luxe (mangue, haricots verts filets et tomates cerises) vers l'Europe.

Dans le périmètre de FRUITVERTS, on trouve deux zones de culture : une partie de l'exploitation (8 ha), la plus éloignée de la bande côtière, est constituée des terres les plus hautes, qui sont assez planes et divisées en grands carrés séparés par des fossés d'irrigation. Jusqu'à présent, les sols, quoique argilo-sableux, étaient assez fertiles pour qu'on y installe les cultures destinées à l'exportation. On y fait donc chaque année, entre septembre et mars-avril, du haricot vert (6 ha), destiné au marché français, et de la tomate-cerise (2 ha) pour le marché hollandais, les cultures se répétant sur les mêmes parcelles d'année en année.



Photo 1 - Cultures installées sur les terres hautes (haricots et tomates-cerises)

Le reste des terres, plutôt sablonneuses (environ 7 ha), descendent en pente douce vers le littoral. Elles sont parcourues de fossés creusés par l'érosion. Comme elles étaient considérées moins fertiles, des cultures de divers légumes (surtout de la tomate, du piment et du gombo), destinés aux marchés environnants, sont installées sur la pente. Les cultures sont réparties par petites surfaces de quelques ares, autrefois séparées par des haies mais qui pour la plupart ont aujourd'hui disparu. Ces petits carrés occupent les terres du sommet du talus jusqu'au bas de la pente où une grande mare sert de réservoir d'eau pour irriguer ces cultures. Sur la pente, Dieudonné a planté quelques arbres pour retenir les terres et fournir un peu d'ombre à ses pépinières. Aussi loin qu'il s'en souvienne, Dieudonné a toujours connu cette répartition des cultures. Les villages environnants s'étalent sur la bande côtière le long de la grande route qui va vers la ville. Chaque villageois possède un petit verger de manguiers et quelques carrés où sont cultivés des légumes (tomates, melon, aubergines,...), du maïs, du sorgho et des arachides selon la saison.



Photo 2 - Carré cultivé chez un petit producteur

Depuis deux-trois ans, Dieudonné constate, en examinant ses comptes, que le revenu qu'il tire de son exploitation a beaucoup diminué. Pourtant, les prix de vente auraient plutôt tendance à augmenter avec le développement des villages et de la grande ville qui sont très demandeurs de fruits et de légumes. Force est de constater que globalement c'est sa production qui a chuté! Son entreprise a produit bien moins de haricots et de tomates-cerises (ce sont les cultures où le rendement a le plus chuté). Pour les autres légumes (tomates, gombo ou piment), la chute de production n'a pas été aussi spectaculaire mais elle n'atteint plus les niveaux des années précédentes malgré les achats répétés d'engrais et de produits phytosanitaires. Malheureusement les petits producteurs n'ont pas pu compenser le déficit de sa production même s'il les a incité à produire le plus possible en augmentant leurs surfaces et s'il leur a distribué de l'engrais composé et des produits phytosanitaires.

Pour produire ses haricots verts et ses tomates-cerises, Dieudonné prépare soigneusement ses terres avec son tracteur, au moyen d'un labour à 30-40 cm pour enfouir les mauvaises herbes et les résidus des cultures précédentes (notamment du maïs cultivé en saison humide). Dieudonné n'a pas lésiné non plus avec les intrants. Il n'a pas hésité à augmenter les quantités d'engrais NPK épandues (100-100-300) en plus du fumier frais qu'il enfouit avec le labour. Il a veillé à traiter plusieurs fois sur la saison ses cultures avec des produits phytosanitaires (insecticides, fongicides) pour espérer augmenter ses rendements. Depuis deux ans, il applique même des herbicides sélectifs en haricot, en tomate, et même en maïs (atrazine), pour garder



son sol propre et limiter la concurrence des mauvaises herbes. Enfin, il a aussi augmenté ces cinq dernières années les apports d'eau d'irrigation pour que les haricots et les tomates profitent pleinement de ses engrais et de ses traitements phytosanitaires. Il a donc installé une plus grosse moto-pompe sur la mare pour pouvoir irriguer plus souvent les haricots verts et les tomates en remplissant d'eau les rigoles qui serpentent dans ses champs. Rien n'y fait.

Ses plantes parfois sont attaquées par des maladies (fusariose par exemple) qui sont traitées avec des fongicides, mais en général les feuilles de ses haricots et tomates sont plutôt d'un vert très foncé. Par contre, lors des périodes de forte chaleur, elles ont tendance à se flétrir plus rapidement. Dieudonné a arraché quelques plantes, mais il n'a pas trouvé sur les racines de trace de nématodes à galles ou de pourriture au collet. Il ne comprend pas ce qu'il se passe.

*Décidemment, Dieudonné n'est pas récompensé de ses efforts. Il aurait bien besoin de l'aide d'un spécialiste. Pouvez-vous l'aider ?*

- *Sur une feuille de papier, essayez de **trier et de lister les problèmes** décrits (sans lire la suite).*
- *Faites la liste **des observations, des analyses et des mesures qui seraient à réaliser pour poser un diagnostic.***

### 5.2.2. Analyse de la situation décrite

*Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au solutionnaire proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces propositions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche.*

#### Solutionnaire proposé :

- **Informations à tirer de l'énoncé**
  - L'entreprise a diversifié ses produits et ses marchés. Elle produit tout au long de l'année.
  - La production est en baisse. C'est aussi le cas chez les petits producteurs où la fertilité a diminué.
  - L'entreprise existe depuis longtemps. Les mêmes cultures se succèdent années après années sur les mêmes parcelles, et les pratiques culturales n'évoluent pas beaucoup.
  - La diversité des cultures sur les terres hautes est limitée (haricot ou tomate / maïs).
  - La rotation est courte. Mais l'alternance haricot-tomate est a priori valable (précédents acceptables).
  - La diversité des cultures est plus élevée sur le reste de l'exploitation et chez les petits producteurs.
  - Les légumineuses favorisent la fixation de l'azote dans les sols.

- La production est en baisse régulière, et celle-ci ne peut pas être attribuée à une pression parasitaire anormale. L'emploi des pesticides est fréquent à cause de la répétition des cultures. Il compense la pression des insectes et des maladies.
- Des traitements herbicides sont effectués (notamment emploi d'atrazine, sélectif en maïs).
- Les sols sont majoritairement meubles et légers (argilo-sablonneux sur les terres hautes et sableux ailleurs), ce qui est a priori favorable à la culture du haricot et de la tomate qui préfèrent des sols plutôt légers.
- Un labour peu profond est effectué (passage de tracteur sur les terres hautes) chaque année.
- Des résidus de cultures et du fumier frais sont enfouis au moment de préparer les terres, juste avant les semis/plantations.
- Des quantités importantes d'eau sont apportées aux cultures.
- Des quantités importantes d'engrais et de pesticides sont apportées aux cultures
- L'entreprise pousse les petits producteurs dans la même direction.
- Les terres en pente sont soumises à l'érosion hydrique.
- Les haies ont disparu, les arbres sont rares.
- **Observations, analyses et mesures qui seraient à suggérer**
  - Réaliser un profil de sol sur 50 cm
  - Observer la couleur du sol
  - Observer la présence de galeries dans le sol et le reste de la faune du sol
  - Réaliser une analyse de sol : pour connaître la teneur en éléments
  - Faire mesurer la teneur en matière organique
  - Faire mesurer le pH du sol
  - Faire mesurer la conductivité électrique du sol
- **Résultats des analyses, mesures et observations**
  - Observations :
    - En réalisant un profil du sol sur 50 cm, que la profondeur de l'horizon superficiel (horizon A) est limitée à 20-30 cm au plus. On observe une zone de discontinuité à environ 30 cm (horizon plus foncé au-dessus d'un horizon beaucoup plus clair).
    - On observe que le sol est brun, voire brun foncé (couleur due à l'argile et à la MO présente)
    - On observe très peu de galeries dans le sol, peu d'insectes et peu de vers de terre
    - On observe des résidus des cultures précédentes peu décomposés.
  - Analyse de sol (teneur en éléments N, P, K, Ca, Mg et autres, en mg/kg):





## 5.3. PARTIE 2 : ANALYSE DES CAUSES

### 5.3.1. Consignes pour l'analyse

Consigne :

*Pour aider Dieudonné, il faut analyser les causes de la faible productivité de son entreprise. Travaillez avec deux outils : un tableau et un arbre des causes. Commencez par compléter le tableau (au besoin, ajoutez des lignes et des colonnes dans le tableau. N'oubliez pas d'utiliser les résultats des analyses de sol et des mesures (pH, CE, MO).*

i

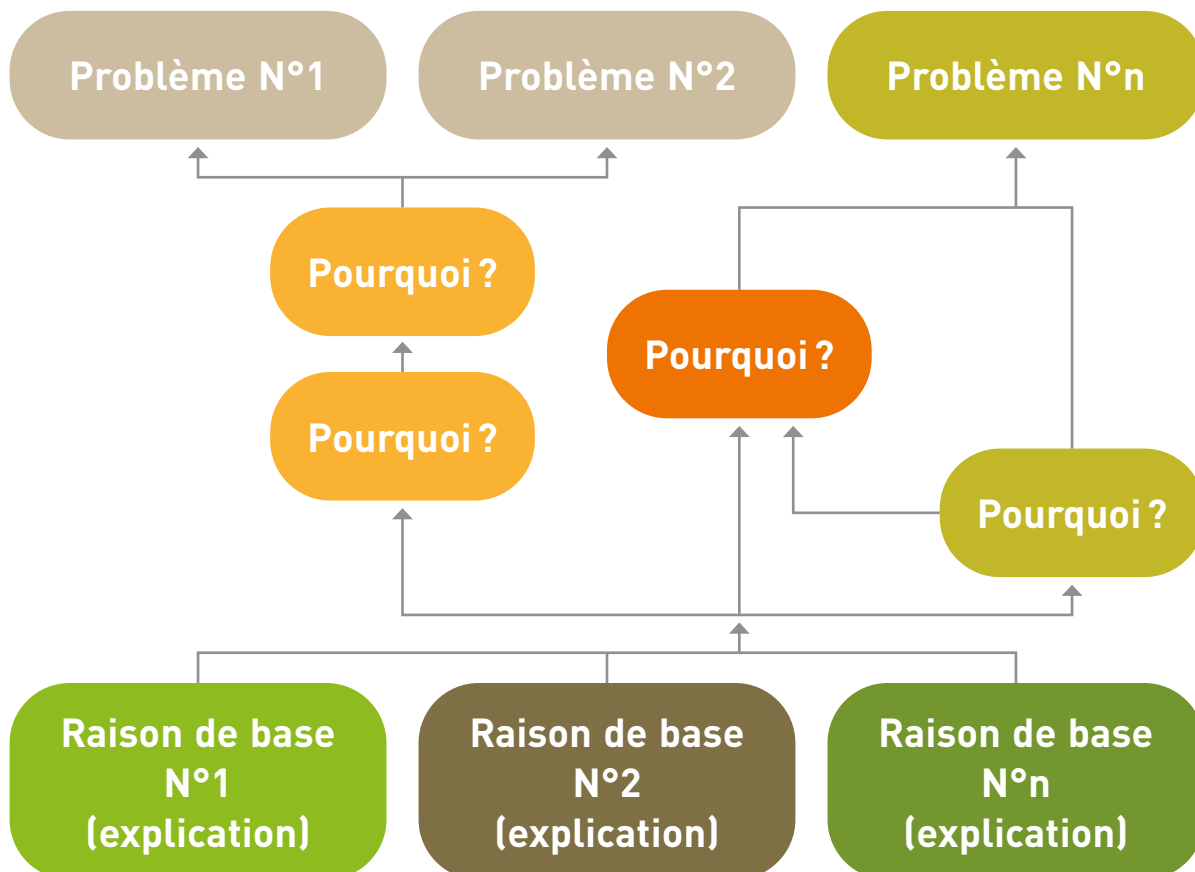
*Quand c'est terminé, réalisez l'arbre des causes sous la forme d'un diagramme (type flow-chart comme sur le modèle) en commençant par mettre les problèmes identifiés dans les cases du dessus et en indiquant dans les cases en-dessous la(ou les) cause(s) probable(s).*

Tableau (exemple à imprimer et à compléter)

Problème identifié (constat, observation)	Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)

### Arbre des causes (exemple de diagramme à construire et à compléter)

Partir des constats (problèmes observés) et remonter aux sources (multiples parfois) qui expliquent l'origine de chaque problème. À la racine, un certain nombre de causes profondes, plus générales.



#### 5.3.2. Analyse des causes : résultat proposé

Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au solutionnaire proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces propositions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche.

## Solutionnaire proposé : tableau

Problèmes identifiés (constat, observation)	
Le rendement général a baissé alors qu'il était satisfaisant auparavant	
Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
<p>Les sols étaient propices à la culture de la tomate, du haricot et des autres légumes (sols légers, meubles, profonds)</p> <p>Par ses pratiques culturales et phytosanitaires, Dieudonné a rendu son sol moins productif (phénomène appelé la « fatigue du sol »), moins résilient, avec une moins bonne économie en eau (structure du sol qui s'est dégradée malgré la présence et les apports de MO).</p> <p>La production des petits producteurs n'a pu compenser la baisse de production de l'entreprise car pour eux aussi la fertilité a diminué : on peut l'attribuer aux mêmes causes (abus des intrants qui a tué la vie du sol)</p>	<p>Répétition des mêmes cultures sur les mêmes parcelles, avec une rotation courte.</p> <p>Pression des maladies et des ravageurs plus importante.</p> <p>Fumure non adaptée (apports excessifs, notamment en azote et en KCl), qui compense mal les exportations dues aux récoltes successives.</p> <p>Irrigation non appropriée (apports excessifs : asphyxie ; eau salée : salinisation du sol ; dispersion des pathogènes).</p> <p>Pratiques culturales non appropriées (fumier non décomposé avant semis ; labour trop superficiel ; usage excessif des intrants)</p>

## Problèmes identifiés (constat, observation)

Salinisation du sol CE = 3,56 dS/m Sol trop riche en sels

Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
<p>A très faible concentration, certains sels présents à l'état naturel dans le sol sont absorbés comme éléments nutritifs par les végétaux. Cependant, à des concentrations plus élevées, les sels solubles peuvent empêcher les racines d'absorber l'eau et les éléments nutritifs du fait d'une augmentation de la pression osmotique et, ainsi, restreindre la croissance des plantes cultivées, d'où un rendement plus faible. Certaines pratiques contribuent considérablement à la salinisation du sol en modifiant l'abondance et l'écoulement de l'eau et des sels dans la rhizosphère.</p> <p>Un niveau de salinité élevé des sols a un effet toxique sur les plantes. Ni le haricot, ni la tomate, ni le gombo ne supportent les apports importants de KCl qui est déconseillé pour ces deux cultures.</p> <p><b>Consultez les Itinéraires techniques du COLEACP pour le haricot vert, la tomate cerise et le gombo.</b></p> <p>Le haricot est très sensible à la salinité (perte si CE &gt; 1 mS/cm).</p> <p>La tomate supporte un peu mieux (perte si CE &gt; 2,5 mS/cm), mais elle est considérée comme sensible.</p> <p>En tomate, le KCl peut induire une carence en Mg (antagonisme connu K/Mg).</p> <p>Le flétrissement observé est la manifestation de cette salinisation.</p> <p>Le sel affecte aussi le métabolisme des organismes du sol et mène à une réduction importante de la vie et donc de la fertilité du sol (les cycles sont ralentis ou même arrêtés; ex: l'humus ne se forme plus).</p>	<p>A cause du changement climatique (rareté des pluies), Dieudonné doit irriguer ses cultures maraîchères. L'entreprise pratique l'irrigation à la raie, avec des apports d'eau massifs et en augmentation...mais sans s'être assuré d'un drainage suffisant et efficace (la nappe est trop proche de la surface à cause de la localisation géographique).</p> <p>L'<b>irrigation</b> est l'une des causes majeures de salinisation; la majorité de ses terres irriguées ont des problèmes de salinité.</p> <p>Lorsque l'irrigation est trop abondante pour être absorbée par les racines des plantes (absence d'un système efficace de drainage), le sol est humidifié en profondeur, permettant au sel de remonter à la surface.</p> <p>L'eau est puisée dans la mare qui s'est formée au bas de la pente, près du littoral. La nappe phréatique salée est remontée dans la nappe d'eau douce à la suite du pompage.</p> <p>La mare collecte les eaux de pluie chargées des sels venant des engrais (notamment apports importants, 300 unités de KCl très soluble).</p> <p>Le défrichage des terres provoque aussi la salinisation. Contrairement à la végétation primitive, les cultures laissent le sol nu certaines périodes de l'année. Les pluies survenant à ces moments ne seront pas absorbées et provoqueront le même phénomène de diffusion du sel vers la surface.</p>



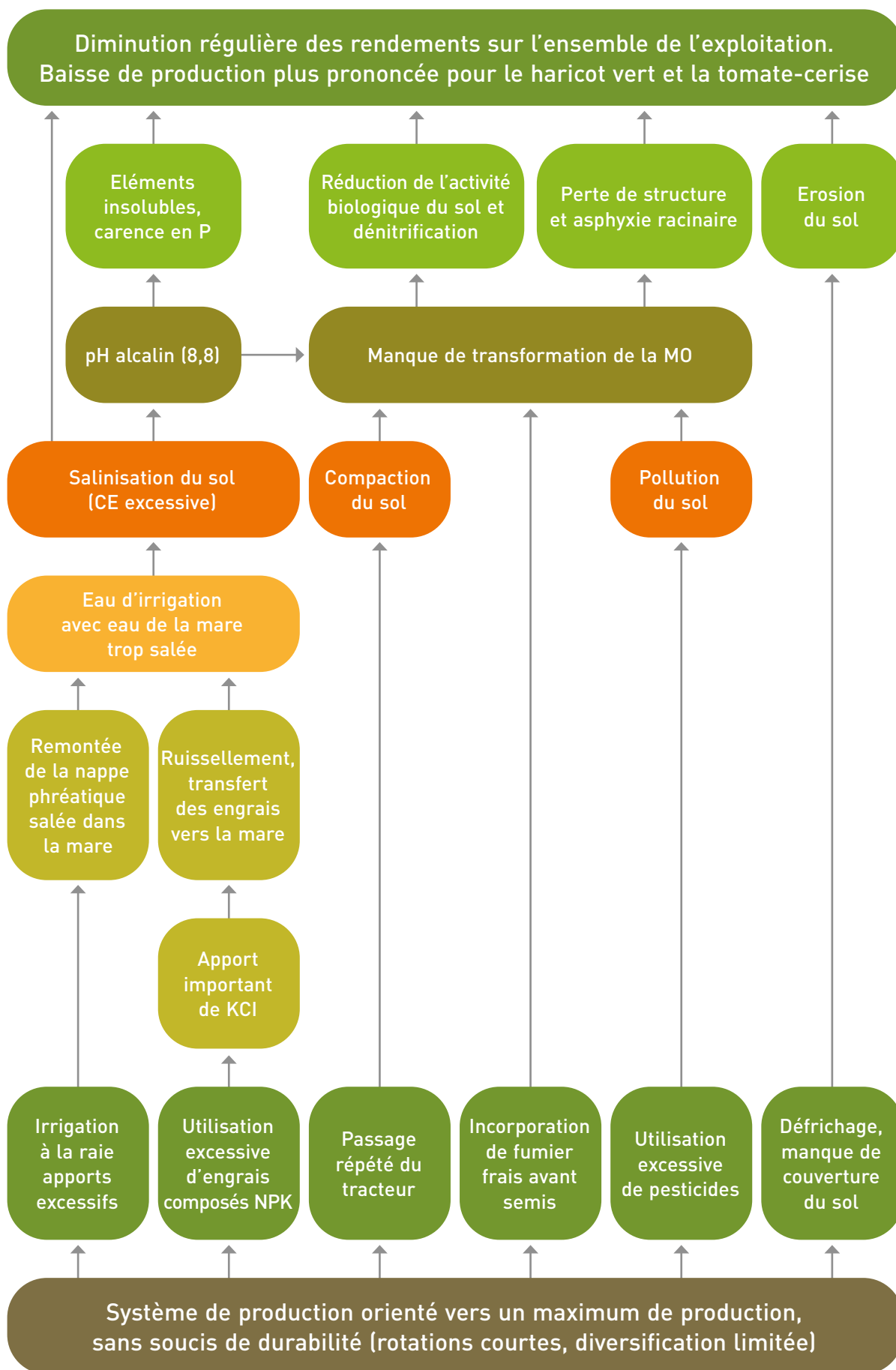
Problèmes identifiés (constat, observation)	
Compaction du sol	
Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
<p>Tassement du sol (outil mais aussi effet des excès d'engrais)</p> <p>Création d'une semelle de labour à 40 cm de profondeur à cause des labours répétés, alors que la tomate exige un sol profond (50 à 60 cm au moins).</p> <p>Mauvaise structure du sol: malgré la teneur en MO (4,60%) la structure du sol n'est pas satisfaisante (sol qui se tasse, sensible à l'érosion, manque de porosité).</p> <p>Un excès de sodium entraîne la destruction de la structure du sol qui, du fait du manque d'oxygène, devient incapable d'accompagner la croissance végétale.</p> <p>Conditions asphyxiantes pour les racines: mauvais pour le haricot et pour la tomate (sensible aux excès d'eau).</p> <p>Chez la tomate, une asphyxie racinaire engendre une carence en Mg. Un billonnage du sol est nécessaire; il faut bien aérer les racines et les maintenir hors de l'eau, or la culture se fait sur un sol plat, avec irrigation à la raie. L'apport d'eau excessif renforce l'asphyxie racinaire chez la tomate.</p> <p><b>Consultez les Itinéraires techniques du COLEACP pour le haricot vert et la tomate cerise.</b></p>	<p>Labour répété (passage du tracteur) à trop faible profondeur.</p> <p>Perte de structure du sol: effet négatif des intrants sur la vie du sol et sur le processus d'humification; la MO s'accumule mais ne produit plus un humus valable.</p> <p>Sol avec peu de porosité (mauvaise circulation de l'eau et de l'air; effet négatif sur la vie du sol, et effet de dénitrification progressif: malgré la culture d'une légumineuse la teneur en N est anormalement faible &lt; 0.7g/kg).</p> <p>Les vers de terre « anéciques » (ceux qui aèrent le sol) qui permettent à l'eau de s'évacuer sont absents à cause de l'effet toxique des pesticides.</p> <p>La salinité accentue la compaction en altérant la structure du sol.</p>

Problèmes identifiés (constat, observation)	
pH du sol trop élevé - $\text{pH}_{\text{eau}} = 8,8$	
Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
<p>Un pH &gt; 7,5 entraîne une diminution progressive des rendements chez le haricot (pH optimum : 6.1-7.4).            Quand le pH &gt; 7 cela peut induire une carence en Mn chez le haricot.            Le pH est trop élevé pour la tomate (pH optimum : 5.5-7.0).            Quand le pH augmente (pH &gt; 7) la disponibilité en P diminue (cela se voit aux feuilles de haricot et tomates qui sont vertes foncées, un symptôme typique du manque de P).            Un manque de phosphore réduit aussi le système racinaire de la tomate, déjà diminué par la présence d'une semelle de labour.</p>	<p>La salinisation entraîne par ricochet une augmentation du pH.            Quand le pH augmente certains éléments sont moins disponibles (notamment le P, ou le Mn) car ils deviennent insolubles, créant des carences alors que l'analyse de sol ne montre pas de déficit.            La coloration des feuilles est un symptôme.</p>

Problèmes identifiés (constat, observation)	
Mauvaise gestion de la matière organique	
Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
<p>Dieudonné apporte de la MO (fumier frais) mais à mauvais escient : il est fortement déconseillé d'incorporer au sol des fertilisants organiques qui ne sont pas parfaitement décomposés avant la culture du haricot, ni même de la tomate.            Il est aussi déconseillé avant tomate d'enfouir les restes de culture.            Pas de jachère.</p>	<p>Les pesticides perturbent la fonction de faune et flore du sol. Une fois perturbées, la faune et la flore n'arrivent pas à la décomposer de la matière organique (minéralisation) conduisant à la perte de la fertilité des sols.</p>

Problèmes identifiés (constat, observation)	
Erosion des sols	
Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
<p>Les hautes terres planes qui étaient productives, dans l'ancien temps, ne le sont plus étant donné que Dieudonné n'a pas pensé à l'érosion éolienne. Ses hautes terres planes ne sont pas protégées par le brise-vent et sont donc sensibles à l'érosion éolienne. En l'absence d'arbres, d'arbustes, de résidus, etc., faisant obstacle au vent, celui-ci met les particules de sol en mouvement sur de grandes distances, ce qui augmente l'abrasion et l'érosion du sol. Comme les buttes et les sommets des collines sont habituellement exposés, ce sont les endroits qui en souffrent le plus.</p> <p>Les terres situées sur les pentes de l'entreprise connaissent des problèmes d'érosion hydrique. Sur les terrains en pente, l'eau ruisselle à la surface du sol. Le ruissellement s'intensifie lorsque le taux d'infiltration diminue sous l'effet du compactage du sol.</p> <p>En plus, l'absence de galeries de vers de terre dans le sol réduit l'infiltration. Quand il y a moins de faune dans le sol, il y a aussi moins de déjections, de structurants, de colles. Les agglomérats ont tendance à être moins liés.</p>	<p>Disparition des haies ; il ne reste que quelques arbres d'ombrage pour les pépinières, ce qui est insuffisant.</p> <p>Erosion sur la pente, car perte de structure du sol (mauvaise gestion de la MO, compaction, salinisation, effet des intrants).</p> <p>Effet toxique des pesticides sur la faune et la flore du sol : moins de vers de terre, ce qui réduit l'infiltration et augmente le ruissellement, favorisant l'érosion. Les vers de terre « anéciques » (ceux qui aèrent le sol) permettent à l'eau de s'évacuer.</p> <p><b>Consultez les divers manuels de formation du COLEACP sur la production durable et responsable.</b></p>
Problèmes identifiés (constat, observation)	
Pollution des sols	
Tentative d'explication	Identification de la (ou des) cause(s) probable(s)
<p>Effet de phytotoxicité : les résidus de l'atrazine utilisée en maïs, et incorporé au sol par le labour, sont très toxiques pour le haricot.</p> <p>Les pesticides utilisés fréquemment et massivement (de plus en plus, à cause des mauvaises rotations) tuent la vie du sol, interrompant les grands cycles biologiques, dont ceux de la MO et de l'azote.</p> <p>Les vers de terre disparaissent.</p>	<p>Les pesticides auxquels Dieudonné fait recours pour augmenter son rendement sont transportés par l'eau de ruissellement pendant les précipitations et finissent par polluer les sols et les puits. Les puits sont très sensibles à la contamination par les pesticides, engrais, etc.</p>

Solutionnaire proposé : arbre des causes







## 5.4. PARTIE 3 : RECHERCHES DE SOLUTIONS APPROPRIÉES

### 5.4.1. Consignes pour la recherche de solutions

Consigne :

*Pour aider Dieudonné, il faut lui proposer des solutions appropriées pour traiter chaque problème identifié. Travaillez en deux temps : lister brièvement les solutions possibles à chacun des problèmes dans un tableau. Vérifiez ensuite si ces solutions sont efficaces, rentables, accessibles et durables (pour chaque solution, évaluez ces 4 critères et attribuez-leur une note entre 1 et 4).*

i

Tableau 1 (exemple à compléter)

Problèmes identifiés (constat, observation)	Proposition(s) de solution(s) (ajoutez quelques explications)
Le rendement général a baissé	S1: ....
Salinisation du sol	S2: S3: ....
Compaction du sol	S4: S5: S6: ....
pH du sol trop élevé	S7: S8: ....
Mauvaise gestion de la matière organique	S9: S10: S11: ....
Erosion des sols	S12: S13: ....
Pollution des sols	S14: S15: S16: ....

Tableau 2 (exemple à compléter)

Solutions proposées	Efficace	Rentable	Accessible	Durable	Score
S1	4	2	3	4	13
S2	2	3	4	1	10
S3	4	4	1	2	11
S4	4	2	4	4	14
S5	...	...	...	...	...
S6	...	...	...	...	...
S...	...	...	...	...	...
Sn	...	...	...	...	...

(1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : bon ; 4 : excellent)

#### 5.4.2. Recherches de solutions appropriées : résultat proposé

*Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au solutionnaire proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ces solutions. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure solution ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera en fin d'exercice à retracer la logique de votre démarche.*

## Solutionnaire proposé : propositions de solutions

## Problèmes identifiés (constat, observation)

Le rendement général a baissé

## Proposition(s) de solution(s)

**S1** : Réviser complètement les pratiques en cours (rotation, travail du sol, gestion des intrants, irrigation,...), adopter les principes de l'agro-écologie et de la gestion intégrée de la fertilisation (GIFS) pour une fertilité durable des sols.

*Dieudonné doit adopter les bonnes pratiques agricoles pour que son entreprise produise beaucoup, comme auparavant. Il doit en faire la promotion auprès des petits producteurs avec qui il travaille.*

*La gestion judicieuse des sols a toujours impliqué qu'ils soient utilisés de manière à maintenir, et si possible, améliorer leur productivité. Pour ce faire, il faut que les pratiques culturales ne modifient pas progressivement les conditions chimiques et physiques du sol, ne diminuent pas son aptitude à la croissance des plantes lorsque la culture maraîchère recommence. En fait, il est normal que la mise en culture entraîne une dégradation des sols du fait de l'exportation des éléments nutritifs au moment de la récolte et des dommages physiques que subit la structure du sol. Ce qui est essentiel est que cette détérioration soit réversible grâce à des bonnes pratiques agricoles : apports raisonnés d'éléments nutritifs, processus naturel de restitution de la fertilité par le maintien de la vie dans le sol, le respect d'une bonne rotation, la mise en place de haies, d'arbres ou d'herbages.*

**S2** : Mettre en place des cultures associées

*La mise en place d'un couvert végétal composé par une association d'espèces adaptées aux conditions du milieu et le recours à des plantes pérennes (arbustes, arbres) présentent de nombreux intérêts susceptibles d'améliorer significativement la productivité des cultures. Il a été montré que les agroécosystèmes plurispécifiques (cultures associées, mélange de variétés ou plantations mixtes) pouvaient présenter une augmentation de productivité de 30 à 60% en comparaison des systèmes mono spécifiques.*

*Les systèmes agroforestiers offrent un grand nombre d'intérêts favorisant le rendement des cultures parmi lesquels une amélioration de l'état sanitaire de l'agro écosystème mais également en entretenant durablement un niveau satisfaisant de fertilité.*

*En plus, ces systèmes favorisent le développement de champignons mycorhiziens. Le rôle majeur des mycorhizes se situe au niveau de la mobilisation pour la plante d'éléments nutritifs très peu mobiles dans le sol, principalement le phosphore. Il serait donc mieux de favoriser les associations bénéfiques en limitant l'emploi de fongicides.*

*L'établissement de la symbiose permet également de favoriser la formation d'agrégats et ainsi d'améliorer la structure du sol. La colonisation du sol par le mycélium engendre une meilleure structuration du sol par la formation d'agrégats beaucoup plus stables.*

## Problèmes identifiés (constat, observation)

## Salinisation du sol

## Proposition(s) de solution(s)

**S3** : Améliorer l'économie en eau des sols : il faut obtenir une meilleure structure (MO de qualité, agglomérats, porosité) pour les rendre plus résilients aux périodes de sécheresse répétées ou prolongées et garder un couvert sur le sol.

*En améliorant l'économie en eau des sols on réduit les besoins d'apports extérieurs en eau et donc le risque de salinisation. Il faut aussi éviter de laisser les sols sans couverture lors des périodes de fortes pluies (remontée de sels et érosion du sol).*

*En améliorant la qualité de la matière organique du sol, il accroît sa capacité à stocker l'eau nécessaire à la nutrition des plantes.*

**S4** : Gérer de façon correcte et rationnelle l'eau d'irrigation : il faut réduire les apports en changeant le mode d'irrigation, ce qui permettrait de drainer l'excès d'eau. Il est donc préférable de passer pour les haricots et la tomate-cerise au goutte-à-goutte. Ailleurs, réduire les apports.

**Consultez le manuel de formation COLEACP sur la Gestion durable de l'eau pour des compléments d'information.**

*Il faut un suivi régulier et précis des besoins en eau des diverses cultures maraîchères selon les saisons et les stades de ces cultures.*

*L'eau de la mare est chargée en sels. Lorsque l'eau d'irrigation est légèrement chargée en sels, on peut apporter un excès d'eau mais il faut alors assurer un drainage efficace qui permette au sel apporté par l'eau d'irrigation de repartir avec l'eau de drainage.*

*Mais, dans le cas présent, il y a un risque de remontée du niveau d'une nappe salée et un contact entre nappe salée et l'eau qui sert à l'irrigation. Il faudrait à la fois drainer la nappe et limiter les apports d'eau d'irrigation.*

**S5** : Réduire les apports de sels : il faut éviter les apports excessifs d'engrais minéraux NPK et proscrire l'emploi du KCl comme apport de potasse. Il faut éviter d'irriguer avec une eau salée (la teneur en sel d'une eau de bonne qualité d'irrigation est de maximum 500 mg/L).

*La réduction des apports en sels dans le sol permettra aux sols de retrouver une activité biologique correcte.*

*Le KCl étant préjudiciable au haricot et à la tomate doit être remplacé par une autre forme d'engrais composé (ex : Patent Kali qui apporterait aussi du MgO ou engrais ternaires). 300 unités de potasse sont excessives. Un maximum de 200 unités serait suffisant. Ne pas oublier que le fumier (ou un compost) apporte aussi du K<sub>2</sub>O en quantité non négligeable.*

**S6** : Eviter de défricher pour étendre les surfaces cultivées : il faut maintenir un couvert et respecter les jachères forestières.

*Dieudonné ne doit pas défricher systématiquement ses terres. Une conséquence peu connue de ce changement brutal d'usage des terres est l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans les sols des versants causée par la diminution de l'évapotranspiration que produit le remplacement des arbres par des plantes saisonnières. Cette perturbation du cycle hydrologique peut conduire à une augmentation des niveaux d'eaux salées et à la salinisation de vastes surfaces de sol. Pour éviter cela, il est important de garder la végétation.*

*En plus, il faut penser à installer des jachères forestières qui sont capables de puiser en profondeur des éléments nutritifs (issus de l'altération des minéraux, de la récupération des solutions drainant au-delà des racines des cultures) et de les recycler à la surface du sol.*

## Problèmes identifiés (constat, observation)

### Compaction du sol

#### Proposition(s) de solution(s)

**S7** : Eviter de créer une semelle de labour : il faut réduire le labour (voire ne plus en faire) et adopter un labour plus profond (50 à 60 cm).

*Un labour trop superficiel a créé une semelle de labour car la structure du sol était mauvaise et fragile. Il faut briser cette semelle de labour et ensuite éviter de labourer quand ce n'est pas utile. Cela évitera aussi le passage répété du tracteur sur les terres. Pour le haricot et la tomate, il est déconseillé d'enfouir les résidus de culture et surtout du fumier frais avant semis ou plantation. Le labour doit donc être fait bien avant pour laisser au fumier le temps de se décomposer.*

*Dieudonné doit penser à la gestion des caractéristiques physiques de son sol et doit viser à préserver la structure de ce dernier ou à l'améliorer par une préparation mécanique appropriée lorsque le sol n'est pas structuré. La préparation du sol est aussi importante pour la lutte contre les adventices qui est souvent la principale justification du labour et d'utilisation d'herbicides. Les techniques de préparation minimum ou nulle du sol donne de bons résultats. Les dégâts que subi la structure du sol du fait du labour, peuvent être évités grâce à ces techniques (préparation minimum ou nulle du sol).*

**S8** : Rendre une bonne structure au sol : il faut avoir un humus bien décomposé, une bonne porosité, une vie biologique valable. Il faut utiliser des amendements organiques de qualité, en quantité suffisante.

*Le sol ne profite pas des apports en fumier car la vie biologique est ralentie et les cycles sont perturbés à cause de l'effet toxique des engrais chimiques en excès, des herbicides et autres pesticides utilisés. Il faut veiller à ce que les vers de terre, les insectes et autres animaux colonisent le profil de sol. Réduire les engrais, réduire l'irrigation pour réduire les apports en sels qui détruisent la structure et stérilisent le sol.*

*Les apports de matière organique restent indispensables, mais il faut les mettre sous la bonne forme (MO bien décomposée) et au bon moment dans la rotation (enfouissement plusieurs mois avant la culture). La GIFS nécessite une combinaison MO-Engrais pour une fertilité durable.*

*La succession de plantes de familles différentes sur la même parcelle est favorable à la structure : grâce aux racines différentes, le profil du sol est mieux exploré, ce qui se traduit par une amélioration des caractéristiques physiques du sol, de sa structure (en limitant le compactage), et donc de la nutrition des plantes.*

*Il faut éviter la formation d'une croûte de battance en travaillant sur sol bien ressuyé, en limitant les passages et en regroupant les outils (peu agressifs et adaptés au type de sol).*

**S9** : Pour la tomate, éviter l'asphyxie racinaire en créant des billons : il faut cultiver la tomate sur des billonnages.



## Problèmes identifiés (constat, observation)

pH du sol trop élevé

## Proposition(s) de solution(s)

**S10**: Réduire la salinité des sols: il faut adopter les solutions S3 à S6.

*L'augmentation du pH est la conséquence indirecte de la salinisation progressive des sols. Il faut donc combattre l'ensemble des causes qui conduisent à cette salinisation pour revenir à un pH acceptable pour la tomate et le phosphore.*

*Il est déconseillé de tenter d'acidifier les sols de manière artificielle (ex: avec l'apport de certains engrais, car une acidification serait encore plus difficile à maîtriser). Les sols ont un pouvoir tampon. En d'autres termes, ils résistent fortement aux variations du pH. Ils renferment souvent des carbonates de calcium et de magnésium. Ces « carbonates libres » réagiront avec les amendements acidifiants en les neutralisant donc empêcheront le pH de baisser.*

*Il est toutefois possible de corriger le pH d'une unité environ en ajoutant du soufre élémentaire au sol (350 kg/ha pour un sol sablonneux, à apporter en plusieurs fois sur un an). Cependant, cela ne pourra fonctionner que grâce aux bactéries qui transforment le soufre en sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). C'est cette conversion qui acidifie le sol.*

*L'utilisation de matière organique acide comme la tourbe n'est pas souhaitable non plus, car peu efficace pour modifier le pH et non compatible avec le respect de l'environnement, ce matériau étant extrait de milieux écologiquement fragiles.*

*L'amélioration de la structure du sol (par l'apport répété de MO bien décomposée) corrigera progressivement le pH du sol pour le ramener vers 7.*

## Problèmes identifiés (constat, observation)

## Mauvaise gestion de la matière organique

## Proposition(s) de solution(s)

**S11** : Apporter de la matière organique bien décomposée et l'incorporer au sol longtemps avant la culture haricot et de tomates

*L'apport direct de la matière organique est nécessaire, mais la MO doit être apportée sous une forme bien décomposée (fumier à maturité, compost); sinon, elle doit être incorporée suffisamment longtemps avant la culture pour que les microorganismes du sol transforment la MO fraîche en humus.*

*La MO du sol joue un rôle majeur dans la rétention des éléments nutritifs. L'association «MO+Engrais» est la base des principes de la GIFS. La MO répond aussi aux besoins en azote et en soufre des cultures maraîchères.*

*La MO joue un rôle dans la stabilisation des agrégats du sol et la survie de la faune du sol à l'origine des pores (galeries) par lesquels l'eau et l'air circulent.*

*La MO constitue le substrat de la quasi-totalité de la vie biologique du sol. On sait que le sol contient des organismes vivants qui lui sont directement profitables, comme ceux qui servent à la fixation de l'azote et au maintien d'une structure favorable.*

*Les composants organiques du sol empêchent la formation de complexes non solubles de fer et d'alumine associés au phosphore, évitant ainsi une diminution de la quantité de phosphore disponible pour les plantes.*

**S12**: Mettre en place un système de jachère améliorée

*Au lieu de cultiver le maïs seul, après le haricot et la tomate, Dieudonné devrait introduire en association avec son maïs du cajan, ou pois d'Angole, une légumineuse fixatrice d'azote dans le sol. L'introduction de pois cajan (*Cajanus cajan*) dans le maïs ne donne pas de travail supplémentaire. Après la récolte du maïs, les tiges de cajan seront laissées en place et continueront leur développement jusqu'à maturité des gousses. Les graines seront récoltées et les feuilles laissées au sol pour y être incorporées. Dieudonné y gagnera de l'azote au bénéfice du maïs et de la MO pour les tomates et haricot.*

*Cette technique sera également vulgarisée auprès des petits producteurs.*

## Problèmes identifiés (constat, observation)

## Erosion des sols

## Proposition(s) de solution(s)

**S13:** Lutter contre l'érosion (hydrique et éolienne): il faut privilégier un système de culture maraîchère sans préparation des sols, maintenir un couvert végétal pour protéger les sols.

*Un avantage majeur des systèmes de culture sans préparation du sol ou avec une préparation minimum est qu'ils peuvent être utilisés pour laisser une couverture de résidus de culture sur le sol afin de le protéger de l'impact direct de la pluie.*

*Cela empêche la dispersion des matériaux constituant les agrégats et maintient la capacité d'infiltration du sol, ce qui minimise le ruissellement et les problèmes d'érosion qui en découlent.*

*Lorsqu'il y a une saison sèche marquée, les termites peuvent détruire les résidus végétaux de sorte que le sol se trouve exposé et vulnérable au début de la saison des pluies. D'autres matériaux de paillage doivent alors être trouvés (herbes ou branches provenant des arbres des alentours de champs de l'entreprise) ou d'autres méthodes, telles que bandes enherbées ou bourrelets en courbes de niveau, doivent être utilisées pour éviter l'érosion. Il peut s'agir de simples bourrelets en terre construits de manière à acheminer l'eau vers un canal enherbé pour éviter la formation de ravinelements observés dans les champs de cultures maraîchères de ladite entreprise.*

*Dans les zones plus sèches, le couvert végétal est aussi important pour protéger le sol de l'érosion éolienne notamment les hautes terres où Dieudonné a l'habitude de cultiver les haricots et la tomate cerise. On reconnaît à présent que le maintien d'une couverture végétale sur le sol est le facteur essentiel pour sa conservation.*

**S14:** Garder ou replanter des arbres et des haies

*Les arbres ont été arrachés ou détruits petit à petit (coupes sauvages). Il faut les remplacer. Il faut rétablir les haies. Des arbres, des haies, des barrières herbacées sur la courbe de niveau ralentissent le ruissellement, filtrent le matériel sédimentaire en suspension dans l'eau et favorisent l'infiltration de l'eau. Par exemple, *Vetiveria zizanioides* est particulièrement adaptée à ces fonctions.*

*Arbres et haies abritent aussi des populations d'insectes auxiliaires, d'oiseaux etc. utiles pour la protection des cultures, et favorisent la présence des pollinisateurs ce qui améliore la productivité.*

## Problèmes identifiés (constat, observation)

## Pollution des sols

## Proposition(s) de solution(s)

**S15**: Réduire l'emploi des pesticides : il faut adopter les principes de la lutte intégrée et diminuer le nombre de traitements.

*Les insecticides, fongicides et herbicides ont des effets délétères sur les organismes et microbes du sol et polluent les eaux utilisées ensuite pour l'irrigation. C'est spécialement vrai car la nappe phréatique est proche de la surface et le sol assez sablonneux. De plus, les résidus d'herbicide, appliqué en surface, ne doivent pas être enfouis par un labour dans le sol car ils sont toxiques pour la culture qui suit.*

*Dieudonné doit respecter des doses à appliquer (limiter les surdosages). Il doit parvenir à la réduire l'utilisation des pesticides en mettant en œuvre des principes de l'agriculture intégrée comme la rotation des cultures et le mélange des variétés maraîchères. Ainsi, la rotation limite les maladies et baisse d'apport d'azote; elle contribue à rompre le cycle vital des organismes nuisibles aux cultures, mauvaises herbes, etc. La succession de plantes de familles différentes sur la même parcelle, par exemple l'alternance de plantes dites nettoyantes et de plantes feuilles (choux de Chine), permet de rompre avec le cycle de certaines adventices ou « mauvaises herbes ».*

**S16**: Réduire l'emploi des engrais composés : ils sont utilisés en excès et en outre ils peuvent amener des métaux lourds dans le sol (ex: Cd). Il faut les remplacer par des fertilisants organiques autant que possible, moins polluants.

*Une stratégie de limiter les pollutions des sols par les engrais est l'application des fertilisants à la bonne période afin d'en augmenter l'efficacité : avant d'appliquer les fertilisant, Dieudonné doit connaître le calendrier agricole et la composition du sol (analyse de sol). C'est notamment la composition du sol qui déterminera si Dieudonné a besoin ou non d'apporter plus de nutriments à ses terres maraîchères. Il doit savoir qu'il est déconseillé de fertiliser ses cultures maraîchères pendant la période où il pleut.*

## Solutionnaire proposé : analyse des solutions

Solutions proposées		Efficace	Rentable	Accessible	Durable	Score total
S1 :	Réviser complètement les pratiques en cours (rotation, travail du sol, gestion des intrants, irrigation,...), adopter les principes de l'agro-écologie et de la gestion intégrée de la fertilisation (GIFS)	4	4	2	4	14
S2 :	Mettre en place des cultures associées	3	2	3	4	12
S3 :	Améliorer l'économie en eau des sols : obtenir une meilleure structure (MO de qualité, agglomérats, porosité) pour les rendre plus résilients aux périodes de sécheresse répétées ou prolongées et garder un couvert sur le sol	2	3	2	3	10
S4 :	Gérer de façon correcte et rationnelle l'eau d'irrigation : réduire les apports (pour les haricots et la tomate-cerise en passant au goutte-à-goutte)	4	4	1	4	13
S5 :	Réduire les apports de sels : éviter les apports excessifs d'engrais minéraux NPK et proscrire l'emploi du KCl comme apport de potasse. Éviter d'irriguer avec une eau salée	4	3	3	3	13
S6 :	Éviter de défricher pour étendre les surfaces cultivées : maintenir un couvert et respecter les jachères forestières	2	1	2	4	9
S7 :	Éviter de créer une semelle de labour : réduire le labour (voire ne plus en faire) et adopter un labour plus profond (50 à 60 cm)	4	3	1	1	9
S8 :	Rendre une bonne structure au sol : obtenir un humus bien décomposé, une bonne porosité, une vie biologique valable. Utiliser des amendements organiques de qualité, en quantité suffisante.	3	3	2	4	12
S9 :	Pour la tomate, éviter l'asphyxie racinaire en créant des billons	4	4	2	2	12
S10 :	Réduire la salinité des sols	4	3	2	4	13
S11 :	Apporter de la matière organique bien décomposée et l'incorporer au sol longtemps avant la culture haricot et de tomates	4	4	3	4	15
S12 :	Mettre en place un système de jachère améliorée (maïs et pois Cajan)	4	3	3	4	14
S13 :	Lutter contre l'érosion (hydrique et éolienne) : système de culture maraîchère sans préparation des sols, maintenir un couvert végétal pour protéger les sols	3	2	3	4	12



S14:	Garder ou replanter des arbres et des haies	3	2	2	4	11
S15:	Réduire l'emploi des pesticides: adopter les principes de la lutte intégrée et diminuer le nombre de traitements	3	2	2	4	11
S16:	Réduire l'emploi des engrais composés, les remplacer par des fertilisants organiques autant que possible	3	2	3	4	12

(1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : bon ; 4 : excellent)

Sur base des scores, 4 groupes de priorités se détachent :

- Priorité 1 : S1 - S4 - S5 - S10 - S11 - S12 (scores de 13 à 15)
- Priorité 2 : S2 - S8 - S9 - S13 - S16 (scores de 12)
- Priorité 3 : S3 - S14 - S15 (scores de 10 à 11)
- Priorité 4 : S6 - S7 (scores de 9)

Mon analyse complémentaire (tableaux libres à remplir) : autres problèmes identifiés et/ou autres solutions proposées

Problèmes identifiés (constat, observation)	Proposition(s) de solution(s) (ajoutez quelques explications)
.....	S...: ....
.....	S...: S...: ....
.....	S...: S...: ....
.....	S...: S...: ....

Autres solutions proposées	Efficace	Rentable	Accessible	Durable	Score
S...:					
S...:					
S...:					
S...:					

(1 : faible ; 2 : moyen ; 3 : bon ; 4 : excellent)

*Classez l'ensemble de vos « solutions » sur base d'un score vous permet d'identifier les actions qui seraient prioritairement à mettre en œuvre, mais le plus important pour la suite est d'avoir une cohérence et une logique dans les interventions. Certaines étapes doivent précéder les autres.*

## 5.5. PARTIE 4 : PLAN D' ACTIONS

### 5.5.1. Consignes pour la présentation d'un plan d'actions

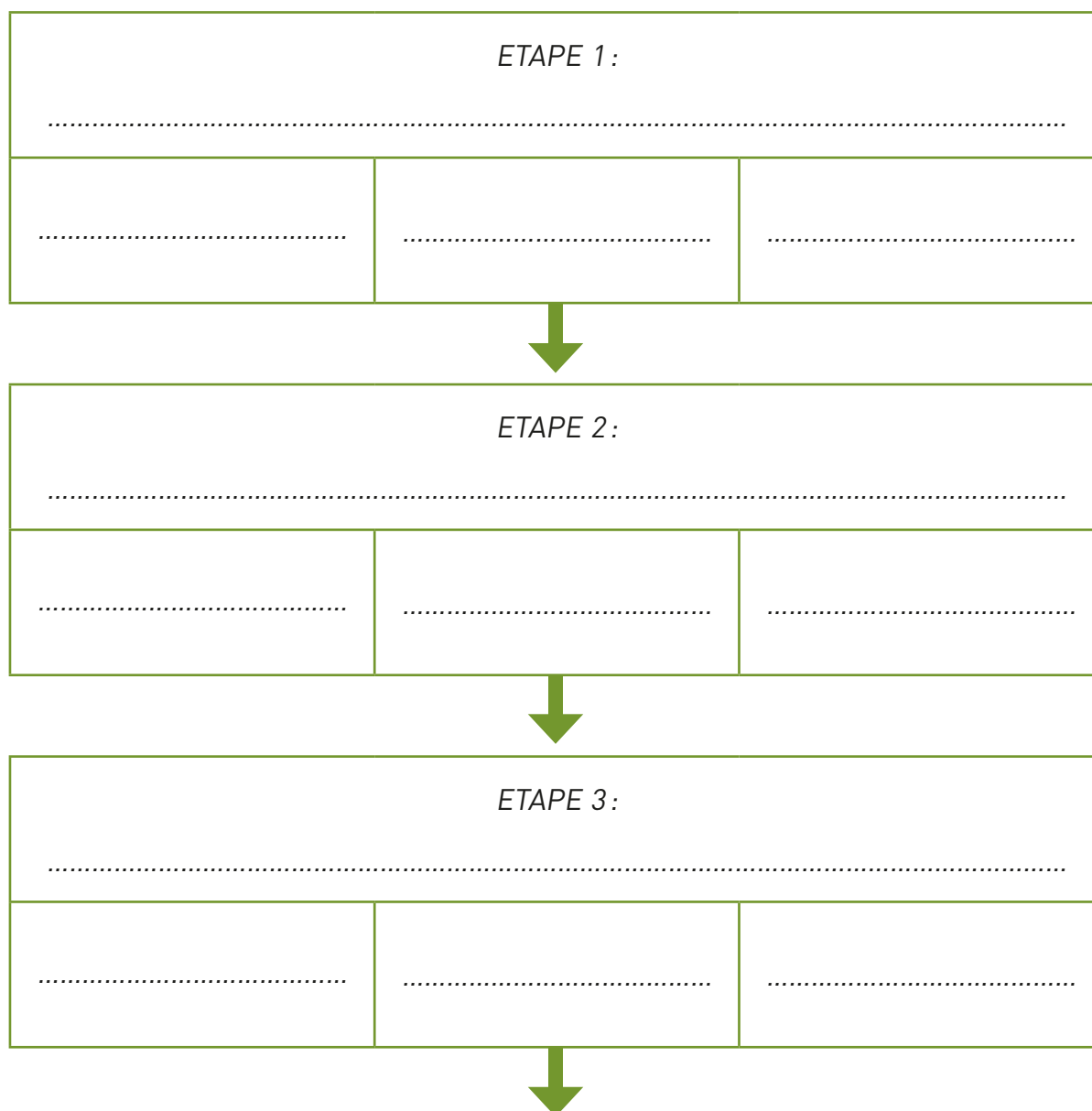
Consigne :

*Pour aider Dieudonné, il faut lui proposer un « Plan d'actions » afin de mettre en œuvre les solutions, en commençant par celles qui sont considérées comme prioritaires. Travaillez avec un schéma (comme l'exemple) pour indiquer la logique de mise en œuvre des interventions.*



#### Schéma du Plan d'actions (exemple de schéma à utiliser)

Indiquer dans le schéma les *N* étapes à suivre (description générale de l'objectif) et les *N* actions à mener dans chaque étape (sur base des solutions considérées comme prioritaires). Dans cet exemple de schéma, on a retenu 4 étapes :



<b>ETAPE 4 :</b>		
.....		
.....	.....	.....

Faites votre propre schéma et proposez un «Plan d'actions» complet. Consultez ensuite le solutionnaire proposé et comparez avec votre schéma.

### 5.5.2. Elaboration d'un plan d'actions : résultat proposé

Vous avez réalisé votre partie de l'exercice ? Bravo ! Comparez maintenant votre résultat au solutionnaire proposé, identifiez les différences et essayez de voir pourquoi votre résultat diffère de ce schéma. Mais peut-être avez-vous imaginé une nouvelle et/ou une meilleure proposition ? Rédigez en quelques lignes votre analyse des résultats et votre perception personnelle : cela vous aidera à retracer la logique de votre démarche.

#### Solutionnaire proposé : propositions de solutions

Le «Plan d'actions» doit se construire en tenant compte des priorités retenues, mais agir sur un élément pour obtenir un effet peut en même temps améliorer un autre problème. Ainsi, si on se base sur les priorités du solutionnaire proposé :

- Priorité 1 : S1 - S4 - S5 - S10 - S11 - S12 (scores de 13 à 15)
- Priorité 2 : S2 - S8 - S9 - S13 - S16 (scores de 12)
- Priorité 3 : S3 - S14 - S15 (scores de 10 à 11)
- Priorité 4 : S6 - S7 (scores de 9)

<b>ETAPE 1 :</b> <b>ANALYSER LE SYSTEME DE PRODUCTION ET LA GESTION DES INTRANTS</b> Réviser complètement les pratiques en cours, intégrer les solutions, en essayant d'adopter les principes de l'agro-écologie et de la gestion intégrée de la fertilisation (GIFS) <i>Cette étape est un préalable indispensable pour déterminer                  les choix possibles et les actions futures.</i> <i>Le Plan d'actions ne produira ses effets qu'au bout de plusieurs saisons.</i>			
Revoir le système cultural (rotation et espèces)	Revoir le travail du sol	Revoir l'irrigation et la gestion de l'eau	Revoir la gestion des intrants

**ETAPE 2:****LUTTER CONTRE LA SALINISATION DES SOLS**

*Il est indispensable de mettre cette étape en priorité car la vie du sol, l'évolution du pH et de la structure en dépendent. Cela doit donc être fait avant les autres interventions.*

*Les effets ne se feront sentir qu'après plusieurs saisons.*

Gérer et réduire les apports d'eau aux cultures	Eviter d'utiliser l'eau de la mare tant que sa salinité ne sera pas diminuée	Remplacer le KCl par une autre forme de potasse	Arrêter le défrichage systématique et ne plus laisser les sols nus
-------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------

**ETAPE 3:****AMELIORER LA GESTION DE LA MATIERE ORGANIQUE**

*La gestion de la MO doit être changée pour que les sols s'enrichissent en humus, pour que les cultures profitent des fertilisants, pour garder au sol une bonne couverture, rétablir une bonne structure et lutter contre érosion.*

*Les effets ne se feront sentir qu'après plusieurs saisons.*

Apporter de la MO bien décomposée : composter le fumier avant de l'utiliser ; incorporer le fumier longtemps avant le semis ou la plantation	Mettre en place une jachère améliorée en inter-saison : associer au maïs habituellement cultivé du pois Cajan
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**ETAPE 4:****RENDRE AU SOL SA QUALITE BIOLOGIQUE EN AMELIORANT SA STRUCTURE**

En plus de changer la gestion de la MO, il faut agir à plus long terme sur la structure du sol

*Cette étape vise à obtenir un humus de qualité grâce au rétablissement des cycles biologiques, notamment réduction de la dénitrification par les bactéries anaérobiques (meilleure vie du sol). Cela permettra au sol de retrouver une bonne structure avec une porosité suffisante (meilleure économie en eau du sol).*

*Eviter les conditions asphyxiantes : la porosité facilitera la circulation de l'air et l'infiltration de l'eau.*

Diminuer les labours, ne pas détruire la litière superficielle	Maintenir un couvert végétal aussi longtemps que possible sur la rotation	Garder ou replanter des arbres et des haies, spécialement sur les pentes	Arrêter le défrichage systématique et ne plus laisser les sols nus
----------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------









# Glossaire

## GLOSSAIRE

<b>Acides fulviques</b>	Fraction des matières organiques définie sur la base de procédés d'extraction chimique. Substances non précipitées par acidification des extraits alcalins d'un échantillon de sol, solubles à tous
<b>Acidification des sols</b>	Phénomène lié à l'élimination de cations échangeables alcalins et alcalino-terreux (principalement $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{Mg}^{2+}$ ) dans un ou plusieurs horizons et qui se traduit par un abaissement du pH. Sur le complexe adsorbant, $\text{Ca}^{2+}$ et $\text{Mg}^{2+}$ sont progressivement remplacés par $\text{Al}^{3+}$ et $\text{H}^+$ . L'acidification résulte de pertes par lixiviation et exportation par les récoltes.
<b>Acidité du sol</b>	Une concentration en ions ( $\text{H}^+$ ) dans le sol. Les sols acides ont un pH inférieur à 7.
<b>Agriculture de conservation</b>	Ensemble de techniques culturales destinées à maintenir et améliorer le potentiel agronomique des sols, tout en conservant une production régulière et performante sur les plans technique et économique. Ces techniques reposent sur trois piliers : la réduction voire la suppression du travail du sol ; les rotations culturales ; l'utilisation de couvert améliorant, les semis se faisant si possible directement à travers le couvert.
<b>Agriculture sur brûlis</b>	Système agraire dans lequel les champs sont défrichés par le feu qui permet un transfert de fertilité puis sont cultivés pendant une période brève pour être ensuite mis en jachère, le plus souvent forestière, à longue révolution (friche forestière). Cette agriculture extensive itinérante peut conduire à une dégradation durable des sols.
<b>Algues</b>	Êtres vivants capables de photosynthèse oxygénique dont le cycle de vie se déroule généralement en milieu aquatique. Elles constituent une part très importante de la biodiversité et la base principale des chaînes alimentaires des eaux douces, saumâtres et marines.
<b>Altération</b>	L'altération se définit comme la destruction mécanique de la structure rocheuse (de la roche solide ou des sédiments consolidés dans (ou sur) laquelle/lesquels le sol s'est développé) qui facilite ensuite les modifications chimiques des minéraux qui la composent. En principe, il existe deux principaux types d'altération : physique et chimique. Certains parlent également d'altération biologique, mais en réalité il s'agit d'une manifestation des actions mécaniques et chimiques.

<b>Amendement</b>	Matériau apporté à un sol pour améliorer sa qualité agricole. Les amendements sont donc utilisés en agriculture et pour le jardinage pour améliorer les terres et les rendre plus productives. L'un des amendements les plus connus est la chaux, utilisée pour réduire l'acidité des sols.
<b>Amont</b>	Côté d'où vient un cours d'eau, sa partie supérieure opposée à la partie inférieure qu'on appelle aval.
<b>Argile</b>	Désigne une matière rocheuse naturelle à base de silicates et/ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths.
<b>Bactéries</b>	Désigne certains organismes vivants microscopiques et procaryotes présents dans tous les milieux. Le plus souvent unicellulaires, elles sont parfois pluricellulaires (généralement filamenteuses) et peuvent également former des colonies dont les cellules restent agglutinées au sein d'un gel muqueux (biofilm).
<b>Bassin versant</b>	Espace drainé par un cours d'eau et ses affluents. L'ensemble des eaux qui tombent dans cet espace convergent vers un même point de sortie appelé exutoire (cours d'eau, lac, mer, océan, etc.)
<b>Battance</b>	Caractère d'un sol tendant à se désagréger et à former une croûte en surface sous l'action de la pluie. C'est une des expressions de la dégradation des sols.
<b>Brise-vent ou coupe-vent</b>	Plantation d'arbres, d'arbustes ou d'autres plantes, généralement perpendiculaire ou presque perpendiculaire à la direction du vent dominant, dont le but est de protéger le sol, les cultures, les habitations et les routes contre les effets du vent, comme l'érosion éolienne, le charriage du sol et la formation de congères.
<b>Caillou</b>	Pierre quelconque de petite dimension, le plus souvent assez dure, qui a pu être façonnée par les glaciers (caillou poli, strié), le vent (caillou à facettes), les eaux (caillou roulé). Fragment de cristal de roche, etc., susceptible d'être poli.
<b>Calcaires</b>	Roches sédimentaires, tout comme les grès ou les gypses, facilement solubles dans l'eau composée majoritairement de carbonate de calcium $\text{CaCO}_3$ mais aussi de carbonate de magnésium $\text{MgCO}_3$ .

<b>Capacité d'Échange Cationique (CEC)</b>	Correspond à la somme des cations que le sol peut échanger. Certains cations sont situés à la surface de particules du sol ayant des charges négatives. Ces cations peuvent échanger leur place avec d'autres cations. C'est pourquoi on les nomme les « cations échangeables ».
<b>Carence en éléments nutritifs</b>	Demande en nutriments est supérieure à l'offre du sol, ce qui provoque la réduction ou la perturbation de la croissance des plantes.
<b>Champignons</b>	Désigne un terme très vaste qui regroupe des micro-organismes vivants (principalement pluricellulaires) tels que les moisissures, les rouilles, ou encore les levures.
<b>Chaulage</b>	Application d'un matériau alcalin (par exemple, de la chaux agricole) tel que le calcaire dolomitique pour augmenter le pH du sol au niveau requis pour la croissance des plantes.
<b>Colloïde</b>	Suspension d'une ou plusieurs substances, dispersées régulièrement dans une autre substance, formant un système à deux phases séparées. Dans un fluide, il forme une dispersion homogène de particules dont les dimensions vont du nanomètre au micromètre.
<b>Complexe argilo-humique</b>	Structure formée d'argile et d'humus. L'humus est la fraction stable de la matière organique du sol, c'est-à-dire qu'elle est peu sujette à la minéralisation, mais participe davantage à la structuration du sol.
<b>Compost</b>	Déchets organiques ou mélange de déchets organiques et de sol mis en tas, arrosés et qu'on laisse se décomposer. On y ajoute parfois des engrais minéraux. Lorsqu'il est formé en grande partie de déchets végétaux, le compost est souvent appelé « fumier artificiel » ou « fumier synthétique ».
<b>Compostage</b>	Processus biologique aérobie de conversion et de valorisation des matières organiques (sous-produits de l'élevage, biomasse, déchets organiques d'origine ménager, etc.) en un produit stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau, riche en composés humiques, le compost.
<b>Courbe de niveau</b>	Ligne formée par les points du relief situés à la même altitude.
<b>Culture associée</b>	la culture associée est un système de culture consistant à cultiver plusieurs espèces végétales ou variétés sur la même parcelle en même temps.



<b>Culture en bandes</b>	Technique de culture suivant des types différents de procédés culturaux, comme la culture en lignes et le gazonnement en bandes successives, le long des courbes de niveau ou perpendiculairement à la direction du vent dominant.
<b>Culture en terrasses</b>	Consiste à cultiver sur des terrains aménagés en terrasses ou planches horizontales étagées et soutenues par des murets de pierres ou par des levées de terre.
<b>Culture par paillis</b>	Méthode de culture dans laquelle les débris organiques ne sont pas incorporés ou mélangés au sol, mais sont laissés à la surface du sol pour servir de paillis.
<b>Demi-lune</b>	Technique agricole visant à déblayer la terre de bassins de quelques mètres, pour former des cuvettes (ou monticules) d'un demi-cercle en formes de demi-lunes ouvertes à l'aide de pic, pioche et pelle.
<b>Effet splash</b>	Désigne l'érosion d'un sol nu provoquée par l'impact des gouttes d'eau. Le splash est susceptible de provoquer, même en l'absence de ruissellement, une reptation des particules sédimentaires.
<b>Engrais</b>	Substances organiques ou minérales, souvent utilisées en mélanges, destinées à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs, de façon à améliorer leur croissance, et à augmenter le rendement et la qualité des cultures. L'action consistant à apporter un engrais s'appelle la fertilisation.
<b>Engrais</b>	Substances organiques ou minérales, souvent utilisées en mélanges, destinées à apporter aux plantes des compléments d'éléments nutritifs, de façon à améliorer leur croissance, et à augmenter le rendement et la qualité des cultures.
<b>Épuisement des nutriments</b>	Exportation des nutriments par les produits végétaux et la biomasse est supérieure à la reconstitution par l'apport de résidus de culture, de fumier de ferme et d'engrais.
<b>Érosion</b>	Fruit d'un processus commençant par une désagrégation des agrégats à la surface du sol. Elle entraîne la formation d'une croûte structurale puis sédimentaire, communément appelée la battance. Cette croûte réduit l'infiltration de l'eau et conduit à la formation de ruissellement.

<b>ETM (élément-trace métallique)</b>	La famille des ETM comprend notamment les éléments suivants: l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le cuivre (Cu), le chrome (Cr), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et zinc (Zn). Ils ont été souvent désignés comme métaux lourds, terme imprécis car certains de ces éléments ne sont pas particulièrement lourds (le zinc), tandis que ces polluants ne sont pas tous des métaux, le cas d'arsenic par exemple.
<b>Eutrophisation</b>	Croissance excessive d'algues ou de plantes aquatiques en raison de la présence de grandes concentrations de phosphates et de nitrates. La décomposition ultérieure des algues conduit souvent à la raréfaction de l'oxygène, causant la mort d'autres organismes.
<b>Facteur principal</b>	Facteur le plus influent dans la détermination du résultat d'un processus donné.
<b>Facteurs limitant la croissance</b>	Facteurs tels que l'eau et les nutriments, d'une part ou les aliments pour bétail et le temps de recherche de nourriture, d'autre part qui limitent la croissance des cultures et du bétail, respectivement.
<b>Faune</b>	Désigne l'ensemble des espèces animales présentes dans un espace géographique ou un écosystème déterminé (par opposition à la flore).
<b>Floculation</b>	Processus physico-chimique au cours duquel des matières en suspension dans un liquide s'agglomèrent pour former des particules plus grosses, généralement très poreuses, nommées floccs. Les floccs sédimentent généralement beaucoup plus rapidement que les particules primaires dont ils sont formés.
<b>Flore</b>	Ensemble des espèces végétales présentes dans un espace géographique ou un écosystème déterminé (par opposition à la faune).
<b>Fumier de ferme</b>	Mélange d'excréments et d'urine des animaux de la ferme, de la litière et des restes de fourrages grossiers ou de fourrage pour bétail, ayant subi une décomposition partielle.
<b>Gravier</b>	Désigne le sable assez grossier, exploité le plus souvent dans les alluvions de rivières.
<b>Grès</b>	Roche sédimentaire détritique, issue de l'agrégation et la cimentation (ou diagenèse) de grains de sable.

<b>Humus</b>	(i) Fraction des matières organiques qui reste dans le sol après décomposition de la plus grande partie des débris végétaux et animaux incorporés dans le sol. Ces matières ont généralement une couleur foncée. (ii) Le terme humus est aussi employé dans une acception plus large pour désigner les divers types d'humus forestiers, dont les principaux sont le mor (humus brut), le moder et le mull. Voir aussi matière organique du sol, mor, moder, mull et horizon du sol. (iii) Matière organique morte, à la surface et dans le sol, subissant un processus permanent de décomposition, de transformation et de synthèse.
<b>Humus</b>	Couche supérieure du sol créée, entretenue et modifiée par la décomposition de la matière organique, principalement par l'action combinée des animaux, des bactéries et des champignons du sol.
<b>Infiltration</b>	Désigne le processus par lequel l'eau pénètre le sol ou un autre substrat à partir de la surface du sol ou du substrat.
<b>Irrigation</b>	Opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production et permettre leur développement normal, en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides.
<b>Lessivage</b>	Mouvement des nutriments de cultures au-delà de la zone des racines principalement dû à un drainage excessif dans des sols à texture grossière.
<b>Limon</b>	Formation sédimentaire dont les grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables.
<b>Lisier</b>	Effluent agricole, mélange de déjections d'animaux d'élevage (urines, excréments) et d'eau, dans lequel domine l'élément liquide. Il peut également contenir des résidus de litière (paille) en faible quantité.
<b>Macronutriments</b>	Éléments nutritifs exigés par les plantes en grandes quantités (c'est-à-dire nutriments qui constituent au moins 0,1% de la matière sèche des plantes).
<b>Matière organique</b>	Ensemble hétérogène constitué de litières, de résidus de culture, de racines vivantes, d'animaux de tailles diverses, etc. Mais aussi de débris végétaux en cours de décomposition et de matières évoluées non identifiables à l'œil (l'humus).

<b>Mauvaises herbes envahissantes</b>	Mauvaises herbes qui sont particulièrement en concurrence avec les plantes ou qui les détruisent.
<b>Oligoéléments</b>	Éléments nutritifs exigés par les plantes en petites quantités (c'est-à-dire nutriments qui constituent moins de 0,1% de la matière sèche de la plante), qui sont souvent suffisants dans la plupart des sols.
<b>Optimiser</b>	Utiliser une ressource de la façon la plus efficace ou la meilleure.
<b>Période de jachère</b>	Période pendant laquelle un champ se repose afin de restaurer la fertilité des sols.
<b>Pesticides (insecticides, raticides, fongicides, et herbicides)</b>	Composés chimiques dotés de propriétés toxicologiques, utilisés par les agriculteurs pour lutter contre les animaux (insectes, rongeurs) ou les plantes (champignons, mauvaises herbes) jugés nuisibles aux plantes.
<b>pH (ou potentiel en H<sup>+</sup>)</b>	Caractère «acide» qui est déterminé par la concentration en protons (proton = H <sup>+</sup> ). Plus le milieu contient de protons et plus le pH est bas (ce qui revient à dire que le milieu est acide).
<b>Photosynthèse</b>	Processus réalisé par les végétaux et qui consiste à utiliser l'énergie du soleil pour créer de la matière vivante à partir du gaz carbonique de l'air et de l'eau du sol.
<b>Porosité du sol</b>	Quantité d'espace rempli d'air et d'eau entre les particules du sol.
<b>Pouvoir tampon du sol</b>	Le pouvoir tampon du sol intervient dans la stabilisation du pH du sol, c'est-à-dire de son acidité. Selon leur composition et leur nature minérale, les sols davantage basiques peuvent réagir aux changements de pH en neutralisant l'acidité. Cette réaction chimique se nomme «effet tampon». Un sol calcaire contient une bonne proportion de carbonate de calcium (minéral basique). Il est donc en mesure de neutraliser chimiquement les acides. Les variations de pH, dans ce type de sol, seront donc moins importantes.
<b>Profil de sol</b>	Ensemble des horizons d'un sol donné; chaque horizon étant une couche repérable et distincte de ce sol.
<b>Purin</b>	Déchets liquides produits par les élevages d'animaux domestiques. Il est constitué principalement d'urines complétées éventuellement de la phase liquide s'écoulant d'un tas de fumier.

<b>Rapport C/N ou rapport carbone sur azote</b>	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.
<b>Recommandations générales pour l'application d'engrais</b>	Recommandations pour l'application d'engrais fixes qui ne considèrent pas la variabilité des sols, des climats et des séquences des cultures.
<b>Reptation</b>	Lent mouvement des particules superficielles du sol vers le bas des versants.
<b>Résidus de récolte</b>	Partie de la biomasse des cultures qui reste quand la partie économique de la récolte, telle que les grains ou les tubercules, a été enlevée.
<b>Rhizobiums</b>	Bactéries présentes dans le sol qui forment des nodules racinaires avec des plantes légumineuses compatibles et qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique (N) dans les nodules.
<b>Roche-mère</b>	en pédologie, la roche-mère est la couche minérale superficielle de la croûte terrestre, dont l'altération va participer à la constitution des sols.
<b>Rotation culturale (ou rotation des cultures)</b>	Suite de cultures échelonnées au fil des années sur une même parcelle. C'est un élément important de la gestion de la fertilité des sols et des bioagresseurs, et donc un atout pour l'augmentation des rendements.
<b>Rotation de cultures</b>	Succession temporelle des différentes cultures cultivées dans le même champ.
<b>Ruissellement</b>	Phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols. Il s'oppose au phénomène d'infiltration. Ce phénomène se produit quand l'intensité des précipitations dépasse l'infiltration et la capacité de rétention de la surface du sol.
<b>Sable</b>	Matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 (limon) et 2 mm (gravier).
<b>Saltation</b>	Désigne les mouvements irréguliers de sauts d'un point à un autre. Il s'agit du processus de transport de sédiment par l'eau ou par le vent. Entraînés par le fluide, les particules (de la taille du sable ou du gravier) se déplacent par sauts.
<b>Santé des sols</b>	Fertilité physique, chimique et biologique des sols.



<b>Sédimentation</b>	Processus dans lequel des particules de matière quelconque cessent progressivement de se déplacer et se réunissent en couches. Les facteurs induisant la sédimentation peuvent être variés en nombre et en proportion.
<b>Semelle de labour</b>	Couche dense de sol sous la surface qui est imperméable à l'eau. Principalement formée par compactage suite au labour répété avec charrue à soc et /ou la circulation des véhicules lourds.
<b>Sols dégradés</b>	Sols déficients en nutriments et appauvris en matière organique, avec une faible activité biologique et une mauvaise structure.
<b>Structure d'un sol</b>	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.
<b>Symbiose</b>	Interaction entre deux organismes différents vivant en association étroite physique, qui est à leur avantage.
<b>Texture du sol</b>	Fait référence à la taille et à la proportion des particules minérales qui le composent. Plus spécifiquement, elle réfère à la proportion de sable, de limon et d'argile contenus dans le sol. Le sable est la plus grosse de ces trois particules.
<b>Toxicité des nutriments</b>	Fourniture des nutriments du sol dépasse la demande de la plante de telle sorte que la croissance est perturbée plutôt que renforcée.
<b>Zai</b>	Technique culturelle traditionnelle originaire d'Afrique de l'Ouest (Mali, Niger, Burkina Faso) aujourd'hui principalement pratiquée par la population du Nord du Burkina Faso (Yatenga).



# Références bibliographiques

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGRIDEA, 2014. Prévenir le compactage des sols, conseils pratiques. Article N°: 2544, 8p.

Amadou T., 2013. Diagnostic des pratiques d'utilisation et quantification des pesticides dans la zone des Niayes de Dakar. Thèse-Université Littoral côte d'Opale, 241 p.

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P., Bureau Dominique «Contribution à la lutte contre l'effet de serre: stocker du carbone dans les sols agricoles de France?» 2002. (Expertise scientifique collective - Rapport d'expertise réalisé par l'Inra à la demande du ministère de l'Ecologie et du Développement durable). Paris, Inra. 334 p.

Barber R., Douglas M.G. & English G., 2000. Guide sur la gestion et la conservation des sols et des éléments nutritifs pour les champs-écoles des agriculteurs. AGL/MISC/27/2000. AGL, FAO, Rome, Italy. 164 p.

Bayen P., Traoré S., Bognounou F., Kaiser D. et Thiombiano A., 2011. Effet du zaï amélioré sur la productivité du sorgho en zone sahélienne. Volume 11 Numéro 3, 18 p.

Bertrand, R., Gigou, J., 2000. La fertilité des sols tropicaux (Le technicien d'agriculture tropicale), Maisonneuve, Paris.

Boeuf F., 1999. Quelques caractéristiques particulières de l'agriculture tunisienne (cultures annuelles) déterminés par les facteurs climatiques. In: Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale. 9<sup>e</sup> année, bulletin n°97, pp 549-554.

Breune I. ; Forest L. ; Petie J., Jobin P., 2000. La structure du sol, un élément clés de sa fertilité. Québec, 6 p.

Cadillon A., Fourrié L., 2014. Fertilité des sols la gérer maintenant pour mieux produire demain, 18 p. Des indicateurs de la fertilité des sols. *Étude et Gestion des Sols*, 22(2015):77-100.

Calvet R, 2003. Le sol, propriétés et fonctions. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces France, 42 p.

Carrière L., 1993. Impact des systèmes d'élevage pastoraux sur l'environnement en Afrique et en Asie tropicales arides et subarides, CIRAD-EMVT, 70 p.

Cherbuy B. (1991), *Les sols salés et leur réhabilitation cas de la Comarca*. Editeur CEMAGREF.

Chotte *et al.* (2001). Jachère et biologie du sol en Afrique tropicale, in La jachère en Afrique tropicale - Ch. Floret, R. Pontanier (2001). Ed. John Libbey Eurotext, Paris 2001, pp. 85-121.

- CTA, 1995. L'agroforesterie pour la conservation du sol. Wageningen, Pays-Bas, 165 p.
- Dapola Da E., 2008. Impact des techniques de conservation des eaux et des sols sur le rendement du sorgho au Centre-Nord du Burkina Faso. Les cahiers d'Outre-Mer, 61(241-242)
- Debost, I. & Cloutier, D., *Les plantes indicatrices outil de diagnostic des sols* OCIA Rive-Nord et Le plan vert du Canada.
- Delaunois, A. (2008). Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols destiné aux agriculteurs et aux agronomes. Chambre d'agriculture du Tarn. 37 p.
- Delville, P.L. (GRET), 1996. Gérer la fertilité des terres dans les pays du Sahel. Diagnostic et conseil aux paysans du compost. Agrodok-séries, N°8, Agromisa Wageningen, Pays- Bas, 73 p.
- Dujardin, J.-M., 2013. *Compétences durables et transférables : clé pour l'employabilité*, COMDUR.
- Dupriez, H., 1996a. *Carnets écologiques : A la découverte d'un écosystème* Terre et vie.
- Dupriez, H., 1996b. *Carnets écologiques : Ruissellement, érosion et fertilité* Terre et vie.
- Dupriez, H., 1999. *Ecole aux champs pour une démarche de communication* Terres et vie.
- Fairhurst, T., 2015. *Manuel de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols*. Consortium Africain pour la Santé des Sols. Nairobi, 179 p.
- FAO, 1980. L'agriculture itinérante et la conservation des sols en Afrique. Rome, 20 p.
- FAO, 1983. Conservation des sols et des eaux : façons culturales appropriées. Rome, 151 p.
- FAO, 1994. Agriculteurs itinérants. Connaissances techniques locales et gestion des ressources naturelles en zone tropicale humide.
- FAO, 1994. Le génie agricole au service du développement : production vivrière en zones de faible production. Façons culturales appropriées. Rome, 20 p.
- FAO, 1999. *Guide pour une gestion efficace de la nutrition des plantes*.
- FAO, 2000. *Stratégie en matière d'engrais*.
- FAO, 2002 «La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des sols», rapport basé sur le travail de Michel Robert (Institut national de recherche agronomique).

FAO, 2003a. *Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne*.

FAO, 2003b. *Les engrais et leurs applications*.

FAO, 2005. *Notions de nutrition des plantes et de fertilisation des sols. Manuel de formation*.

FAO, 2012. *La fertilisation localisée au semis des cultures ou microdose. Fiche d'information*.

FAO, IFA & IMPHOS, 2003. *Les engrais et leurs applications* 4<sup>ème</sup> ed., Rabat.

FiBL, 2013. Les principes de la fertilité des sols, construire sa relation avec le sol. 32 p

François R. (2008), *Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité*, Edition DUNOD, Paris, 1152 pages.

Frisque M., 2007. Gestion des matières organiques dans les sols en Région wallonne : avantages agronomiques, avantages environnementaux et séquestration du carbone. Mémoire ULB, 96 p.

Gelin, S., Stengel P., 1998. Sol : Interface fragile. INRA, Paris, 1998.

Gobat J., Aragno M. et Matthey W., 2003. Le Sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols, 2<sup>e</sup> édition, Bruxelles, 21 p.

Gros, A., 1969. *Engrais : Guide pratique de la fertilisation* 5<sup>ème</sup> éd., La maison rustique Paris.

Grunberger, O., 2015. Dynamiques salines des sols des milieux arides et semi-arides. Sciences de la Terre. Université de Montpellier.

Hateb M., 2012. Pollution des sols par des pesticides et les engrais, 17 p.

Hinimbio Taïda Pierre (2016). Agroécologie et gestion durable des sols en Afrique soudano-sahélienne. Editions L'Harmattan, 215 p.

<http://ec.europa.eu/environment/soil/> (European soil portal, Soil data and information systems – JRC soil, CE). La stratégie thématique en faveur de la protection des sols, Volume 3: Organic matter Rubrique > Soil Themes > Soil Organic Carbon Content.

Inckel M., Peter de Smet, Tersmette T., Veldkamp T. et Dongen V., 2005. La fabrication et l'utilisation.

Inra. Dossier Inra : « Le sol ». 2009. Versailles : Éditions QUAE. 183 p.



IRD, 2008. Les dossiers thématiques de l'IRD. Coordination générale : Catherine Fontaine. : *Les sols des milieux vivants très fragiles*.

[http://www.suds-en-ligne.ird.fr/sols/liens\\_utiles.html](http://www.suds-en-ligne.ird.fr/sols/liens_utiles.html). Consulté le 08/06/2017.

Kintche K., 2011. Analyse et modélisation de l'évolution des indicateurs de la fertilité des sols cultivés en zones cotonnières du Togo. Thèse (UB-UL), 192 p.

Kovda, V.A., 1983. Loss of productive land due to salinization. *Ambio*, 12, 91-93

Kuypers H., Mollema A. et Toppe E., 2004. La protection des sols contre l'érosion dans les zones tropicales, Agrdok 11. Wageningen, Pays-Bas, 99p.

Lal, R. 1995. Tillage systems in the tropics: Management options and sustainability implications. *Soils Bulletin* 71. FAO, Rome, Italy.

Lumarque, W., 2002. *Evaluation des possibilités d'utilisation des engrais verts dans les systèmes de production traditionnels des zones tropicales. Travail de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Spécialisées en Gestion des Ressources Animales et Végétales*.

M'Biandoun M., Guibert H. & Olina J.P. (2002). Caractérisation de la fertilité du sol en fonction des mauvaises herbes présentes. Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun. Prasac, N'Djamena, Tchad – Cirad, Montpellier, France.

Maba B., 2007. Identification des éléments nutritifs majeurs limitants et des stratégies appropriées de fertilisation sous culture de maïs dans l'Ougou-Est de la région des plateaux, Togo, Lomé. Mémoire-Université de Lomé, 1060 p.

Macleane, A.J. & Hore, F.R., 1975. *Fumiers et compost*.

Mermoud A. (2001), *Cours de physique du sol : Maitrise de la salinité du sol*. Version provisoire : 14 p. Ecole Fédérale de Lausanne

Morellet F., 1998. L'analyse de terre aujourd'hui. GEMAS, Nantes, 184 p.

Mustin, M., 1987. *Le compost : gestion de la matière organique*, F. DUBUSC, ed., Paris.

Myriam Gagnon, 2009, « Le diagnostic de l'état des sols »

Naika, S. et al., 2005. *La culture des tomates* : Série Agrodok n°175<sup>ème</sup> ed., Agromisa Wageningen, Pays- Bas.

Naitormbaide M., 2007. Effets des pratiques paysannes actuelles de gestion de la fertilité sur les caractéristiques physico-chimiques et la productivité des sols de savane du Tchad : cas de Nguétté I et Gang. DEA- UBP, 106 p.

Ndzana Abanda R., 2012. Régulation des bio-agresseurs dans les cultures associées du blé dur et de pois: impact de la diversité végétale sur la démographie des pucerons du pois. Thèse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 141 p.

Nicolardot, B., 2014. *Fertilisation et amendements* 3<sup>ème</sup> ed. Educagri Montpellier SupAgro.

Noomene H, 2011. *Etude de la salinite des sols par la methode de detection electromagnetique dans le perimetre irrigue de Kalàçat Landelous en Tunisie : cas d'une parcelle de courge*. Faculté des lettres, des arts et des humanités Manouba, Master de recherche environnement, aménagement et risque.

Noyé, D. & Piveteau, J., 2005. *Guide pratique du formateur: concevoir, animer, évaluer une formation*, INSEP CONS, ed.

Parnaudeau, V. et al., 2012. *Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture : le logiciel SYST'N*.

Pinners, E. et al., 1989. Agrodok-Série N°17: La culture de la tomate, du piment et du poivron 1ère ed. Agromisa Wageningen, Pays- Bas.

Posset J., 2002. Engrais verts et fertilité des sols. 2<sup>e</sup> éd., France, 53 p.

Randrianarison, L. B. (2016). Développement d'animations pédagogiques sur la fertilisation raisonnée pour une production durable de fruits et légumes à Madagascar. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme en Master Complémentaire International de Protection des cultures tropicales et subtropicales, ULg/Gembloux Agro-Bio Tech, 105 p.

Raoul C., 1989. Monsieur le Capital et Madame la Terre: fertilité agronomique et fertilité économique. INRA, Paris, 35 p.

Samanke A., 2007. Dégradation des sols et développement durable: analyse des stratégies paysannes de lutte contre la dégradation de sols en zone cotonnière du Mali. DEA ULg et UCL, 195 p.

Schiffers B., 2011. Manuel de formation du COLEACP: Système de production durable. 130, rue du Trône, B-1050 Bruxelles, Belgique, 213 p.

Schöll R., 1998. Gérer la fertilité du sol. Agrodok-Série N°2, Agromisa Wageningen, Pays- Bas, 87 p.

Schwartz, C., Muller, J.-C. & Decroux, J., 2005. *Guide de la fertilisation raisonnée*, France Agr.

Sebillotte M., 1989. Fertilité et systèmes de production. INRA Paris, 370 p.

Servant J. (1975), *Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes*. Exemple des sols salés du sud et de sud-ouest de la France. Thèse doc. Es sciences Naturelles, ENSA Montpellier, France.

Shili I., 2009. Analyse du fonctionnement d'une association du blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et d'une plante de couverture sur une échelle annuelle par modélisation et expérimentation. Thèse, Agro Paris Tech., 189 p.

Sileshi G, Akinnifesi FK, Ajayi OC, Place F., 2008. Meta-analysis of maize yield response to planted fallow and green manure legumes in sub-Saharan Africa. *Plant and Soil* 307: 1-19.

Slama F. (2004), *La salinité et la production végétale*. Centre de publication universitaire. Tunis:151p

Soltner D., 1977. Phytotechnie générale. Les bases de la production végétale, Tome1 ; 6<sup>e</sup> éd., Sainte-Gemmes- Sur- Loire, 456 p.

Soltner D., 1990. Les bases de la production végétale, Tome 1 : le sol, 18<sup>e</sup> édition, Angers 472p.

Soltner, D., 1977. Phytotechnie générale : Les bases de la production végétale. Tome I : Le sol 6<sup>ème</sup> édition.

Soltner, D., 1978. Phytotechnie spéciale : Les grandes productions végétales, 9<sup>ème</sup> édition.

Unger P., 1989. Conservation des sols et des eaux : façons culturales appropriées. Bulletin pédologique, FAO Rome, 36 p.

Unger, P.W., Jones,O.R. et Laryea, K.B.,1995. Sistemas de labranza y practicas de manejo de suelos para diferentes condiciones de tierras y climas. Dans : Memoria de la segunda reunion bienal de la Red Latinoamericana de Labranza Conservacionista, Eds.I.Pla Sentis et F.Ovalles, Guanare, Acarigua, Venezuela, RELACO, pp.82-117.

Vallerie M., 1968. Fertilité et fertilisation des sols. Cours donné à l'Ecole Fédérale Supérieure d'Agriculture. ORSTOM, 194 p.

Verheij, E., 2006. La culture fruitière dans les zones tropicales. Agrodok-Série N°5 : Agromisa Wageningen, Pays- Bas.

Zougmore R., Zida Z. & Kambou N., 1999. Réhabilitation des sols dégradés : rôles des amendements dans le succès des techniques de demi-lune et de zai au Sahel. *Érosion*, 19, 536-550.

Zougmore R., Zida Z., 2000. Rapport d'activités de recherche-développement dans le cadre du PS-CES/AGF dans le Plateau Central (INERA-département GRN/SP). INERA-UCP, 50 p.





# Sites Web utiles



## SITES WEB UTILES

AGRIDEA :

<http://www.agridea.ch/>

AN : Importance de phosphore dans le sol

<https://www.agriculture-nouvelle.fr/phosphore-fertilisation-indispensable/>

A2C : Enjeux de la protection des sols

<http://agriculture-de-conservation.com/Les-enjeux-de-la-protection-des.html>

ARVALIS :

<http://www.arvalis-infos.fr/>

AUF : Cours en ligne (sur l'érosion)

<http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/I.Origine.html><http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/III.Facteurs.html><http://www.ma.auf.org/erosion/chapitre1/VI.Lutte.html>

BANQUE MONDIALE :

<http://www.banquemondiale.org/>

CERES : Besoins des plantes

[http://lecercleceres.org/upload/lesbesoinsdesplantesposter\\_1366903613.pdf](http://lecercleceres.org/upload/lesbesoinsdesplantesposter_1366903613.pdf)CNRS (SAGASCIENCE) : Modes de gestion agricole  
et influences sur la biodiversité du sol[http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/?pid=decouv\\_chapC\\_p5\\_d1&zoom\\_id=zoom\\_d1\\_2](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbiodiv/?pid=decouv_chapC_p5_d1&zoom_id=zoom_d1_2)

COMIFER :

<http://www.comifer.asso.fr/>

FAO : Nombreuses pages à consulter, telles que :

<http://www.fao.org/soils-portal/about/definitions/fr/><http://www.fao.org/ag/ca/fr/1a.html><http://www.fao.org/docrep/003/V4830F/V4830F00.HTM><http://www.fao.org/docrep/w7304f/w7304f0a.htm>FAO, 2002. Dossier de fond : *Le sel de la terre :  
un danger pour la production vivrière.*Site web : <http://www.fao.org/worldfoodsummit/french/newsroom/focus/focus1.htm>

GNB : Autre documentation sur le phosphore

[http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/10/agriculture/content/terres\\_et\\_environnement/durabilite\\_environnement/phosphore.html](http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/10/agriculture/content/terres_et_environnement/durabilite_environnement/phosphore.html)

OMAFRA : Autres cours en ligne (sur l'érosion)

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-054.htm#1>

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-054.htm>

SVT : Description d'un sol (définition)

<http://www.vivelessvt.com/lycee/le-sol-2/>

SUELOS : Horizons de sol

<http://www.suelosdearagon.com/userfiles/images/perfil.jpg>

SOS2 : Restauration de la fertilité des sols

<http://www.alliance21.org/2003/article918.html>

SVT : Nutrition des végétaux

<http://soutien67.free.fr/svt/vegetaux/nutrition.htm>

UNIVERSITE DE NICE : Plusieurs pages en ligne sur les sols, telles que :

<http://unt.unice.fr/uoh/degsol/formation-sol.php>

<http://unt.unice.fr/uoh/degsol/strategies-techniques.php>

<http://unt.unice.fr/uoh/degsol/formation-sol.php#vegetation>

ULaval : Sources d'azote dans le sol

<http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/20487/ch02.html>

UP : Autre documentation sur l'érosion du sol

[https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/Erosion\\_sol/Erosion-sol.htm](https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/Erosion_sol/Erosion-sol.htm)

UNIVERSALIS : Autre documentation sur la nutrition (minérale) des plantes

<http://www.universalis.fr/encyclopedie/absorption-vegetale/>





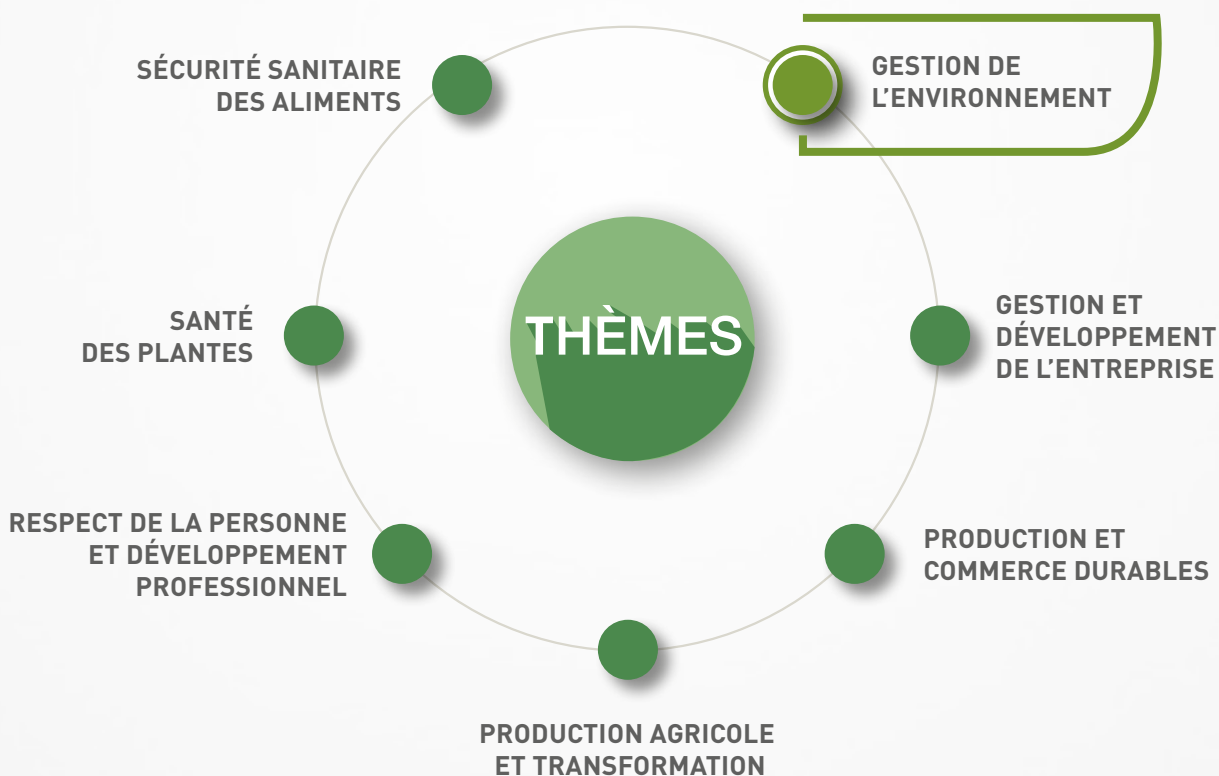




# PLATEFORME E-LEARNING DU COLEACP

RECEVEZ VOTRE ACCÈS À NOTRE PLATEFORME DE FORMATION À DISTANCE RÉSERVÉE AUX ACTEURS DU SECTEUR AGRICOLE DANS LES PAYS D'AFRIQUE, DES CARAÏBES ET DU PACIFIQUE.

TESTEZ ET AMÉLIOREZ VOS CONNAISSANCES À VOTRE RYTHME !



<https://training.coleacp.org>



PRODUCTION ET COMMERCE  
DURABLES

SANTÉ DES PLANTES

SÉCURITÉ SANITAIRE  
DES ALIMENTS

PRODUCTION AGRICOLE  
ET TRANSFORMATION

RESPECT DE LA PERSONNE ET  
DÉVELOPPEMENT PROFESSIONNEL

**GESTION DE  
L'ENVIRONNEMENT**

GESTION ET DÉVELOPPEMENT  
DE L'ENTREPRISE

MÉTHODOLOGIES  
DE FORMATION