



10 CLÉS

COMPRENDRE
LE SOL
SES FONCTIONNEMENTS
ET SES FONCTIONS

Raoul Calvet

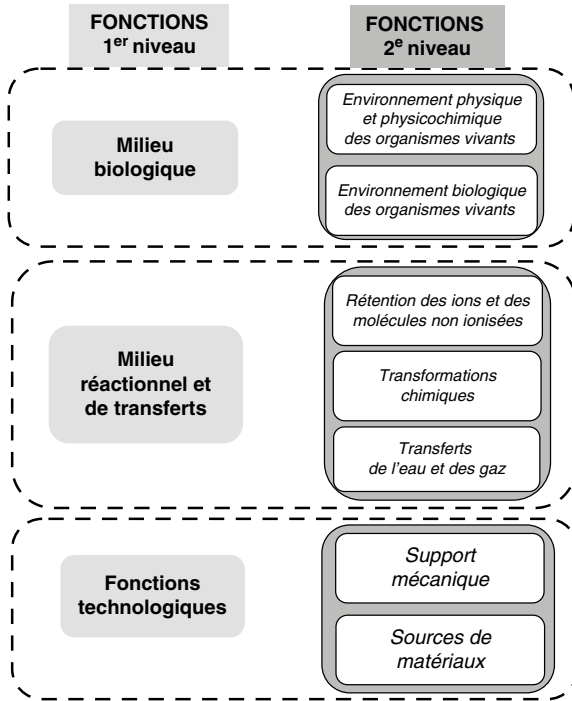
Introduction

À quoi sert le sol ? Que se passe-t-il dans le sol ?

Ces deux questions se posent naturellement (ou devraient se poser) à toutes les personnes intéressées par les milieux naturels et particulièrement par celles qui les utilisent. Certes, le sol a été perçu différemment au cours de l'évolution de l'humanité. D'abord considéré comme un simple plancher sur lequel on marche, puis progressivement comme le support des productions animales et végétales, il est aujourd'hui appréhendé comme un compartiment des écosystèmes naturels ou modifiés par l'homme, les agro-écosystèmes par exemple.

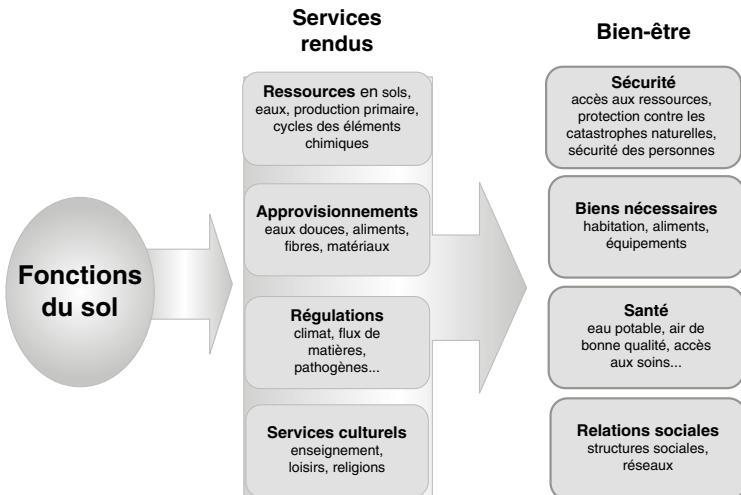
C'est dans ce contexte qu'il faut examiner la première question dont la réponse ne peut cependant pas être séparée de celle apportée à la deuxième pour comprendre le fonctionnement du sol et la nature des fonctions qui en résultent. Trois sont générales et constituent un premier niveau qui se décline en plusieurs autres fonctions dites de deuxième niveau (*figure 0.1*).

Figure 0.1 Les fonctions du sol indiquent à quoi sert le sol



Toutes les fonctions du sol contribuent aux services rendus par les écosystèmes aux êtres humains et donc à leur bien-être (figure 0.2, où les flèches signifient « contribuent à »).

Figure 0.2 Les services et le bien-être



On comprend alors que toute action néfaste à l'égard des constituants du sol, minéraux, organiques ou vivants, susceptible d'altérer ces fonctions, peut être dommageable et compromettre les services rendus par les écosystèmes, ainsi que nuire au bien-être des êtres humains.

De nombreuses connaissances sont nécessaires pour analyser le fonctionnement global du sol, c'est-à-dire les fonctionnements physique, chimique et biologique, pour décrire les fonctions qui en résultent, les préserver, voire les améliorer. Toutefois, certaines sont plus importantes que d'autres et peuvent être groupées en dix ensembles que l'on peut considérer comme des clés pour comprendre ce fonctionnement.

Du point de vue de sa constitution, tout repose sur le fait que le sol est un milieu poreux constitué par une phase solide discontinue et un espace sans matière solide, l'espace poral. Cet ensemble possède des activités chimiques, physicochimiques et biologiques. Il permet le transport des fluides (eau et gaz), de diverses substances chimiques et constitue un remarquable milieu de vie pour de nombreux organismes vivants de toutes tailles. Ces caractéristiques expliquent pourquoi le sol est impliqué dans plusieurs processus importants du point de vue agronomique et environnemental.

Cependant, le sol n'est pas un milieu figé mais, au contraire, un milieu qui évolue sous les effets de facteurs liés au climat, à la topographie et aux usages qui en sont faits. À part la pédogenèse qui concerne généralement de grandes durées (décennies, siècles), les problématiques agronomiques et environnementales se situent plutôt dans des échelles de temps plus réduites allant de la journée à quelques décennies. Dans ce cadre, les évolutions du sol qu'il faut envisager sont dues aux effets des pratiques et des techniques d'utilisation qui s'ajoutent aux effets de facteurs naturels comme le climat. Elles peuvent conduire à sa dégradation ou permettre au contraire de le préserver et de l'améliorer.

Les dix clés concernent, d'une part, les caractéristiques du sol et les processus qui s'y déroulent, d'autre part, les conséquences de ses évolutions. Leur énumération conduit à une définition du sol à la fois globale et fonctionnelle.

10 clés pour comprendre les fonctionnements et les fonctions du sol

1. Le sol est un **milieu poreux**.
2. Des ions et des molécules non ionisées sont **immobilisés et mobilisés** dans le sol.
3. Des **organismes vivants** sont présents dans le sol.
4. Des **transports de matières** ont lieu dans le sol.
5. Le sol est le siège de **transformations chimiques**.
6. Le sol est un **réservoir d'eau** pour les organismes vivants.
7. Le sol est une source de **nutriments** pour les végétaux.
8. Le sol influence la **qualité de l'air et des eaux**.
9. Le sol est un **milieu menacé**.
10. Les **pratiques culturelles** et les fonctionnements du sol.

Du fait de la complexité du milieu pédologique et des processus qui s'y déroulent, les correspondances entre ces clés et les fonctions du sol ne sont pas toutes univoques. Plusieurs clés sont nécessaires à la compréhension d'une fonction et une même clé peut être utile à la compréhension de plusieurs fonctions. Toutefois, le sol n'existe pas en tant qu'entité isolée, mais il est placé dans un contexte environnemental puisqu'il est une partie d'un écosystème. Cela signifie que son fonctionnement et ses fonctions dépendent aussi du climat, du relief et de l'environnement socio-économique.

Ce petit ouvrage se propose d'apporter une aide à la compréhension des fonctionnements et des fonctions du sol de la manière la plus simple possible. Aussi, le lecteur est invité à consulter les ouvrages cités dans les annexes pour y trouver des informations détaillées et approfondies ainsi que de nombreuses références bibliographiques.

Sommaire

Introduction	V
1 Le sol est un milieu poreux	1
Chapitre 1.1: La phase solide du sol	5
Chapitre 1.2: L'espace poral	9
Chapitre 1.3: Les variations spatiales de la structure	11
2 Des ions et des molécules non ionisées sont immobilisés et mobilisés dans le sol	15
Chapitre 2.1: Constituants à l'origine des processus de mobilisation et d'immobilisation	19
Les constituants minéraux	19
Les constituants organiques	20
Chapitre 2.2: Conséquences des processus de mobilisation et d'immobilisation	21
3 Des organismes vivants sont présents dans le sol	25
Chapitre 3.1: Nature des organismes vivants	29
Chapitre 3.2: Les facteurs agissant sur les organismes	33
Facteurs physiques	33
Facteurs chimiques et physicochimiques	34
Facteurs biologiques	36
4 Des transports de matières ont lieu dans le sol ...	39
Chapitre 4.1: Le transport de l'eau liquide	43
Le régime hydrique du sol	43
Les régimes hydrodynamiques	44

Chapitre 4.2: Le transport des substances chimiques.	49
Le transport en phase gazeuse	49
Le transport en phase liquide	50
5 Le sol est le siège de transformations chimiques	51
Chapitre 5.1: Les catégories de réactions chimiques.	55
Réactions d'ionisation	55
Réactions d'oxydoréduction	56
Hydrolyse des composés organiques	58
Réactions de complexation	59
Précipitation	59
Chapitre 5.2: Les agents des transformations chimiques.	61
Les agents abiotiques	61
Les agents biologiques	61
Chapitre 5.3: Les facteurs agissant sur les transformations chimiques dans le sol	63
6 Le sol est un réservoir d'eau pour les organismes vivants	65
Chapitre 6.1: La biodisponibilité de l'eau	69
Chapitre 6.2: La quantité d'eau biodisponible	73
7 Le sol est une source de nutriments pour les végétaux	77
Chapitre 7.1: Biodisponibilité des nutriments et quantités biodisponibles	81
Chapitre 7.2: Les biotransformations relatives aux nutriments	85
Chapitre 7.3: L'immobilisation des nutriments	87

8	Le sol influence la qualité de l'air et des eaux	91
	Chapitre 8.1: Le sol et la pollution de l'air.	97
	Chapitre 8.2: Le sol et la pollution des eaux. . . .	101
9	Le sol est un milieu menacé	103
	Chapitre 9.1: Dégradations chimiques	107
	Chapitre 9.2: Dégradations physiques.	111
	Chapitre 9.3: Dégradations biologiques.	113
10	Les pratiques culturales et les fonctionnements du sol	117
	Chapitre 10.1: Les apports au sol	121
	Chapitre 10.2: La gestion des couverts végétaux	125
	Chapitre 10.3: Les interventions mécaniques sur le sol.	127
	Chapitre 10.4: Les pratiques en relation avec l'hydrologie du sol.	129
	Index	131
	Bibliographie	135
	Liste des figures	137
	Liste des tableaux	139

CLÉ



**Le sol est
une source
de nutriments
pour les végétaux**

Quels nutriments ? Comment ?

Il existe deux catégories de nutriments :

- les **macronutriments** (azote, phosphore, potassium, soufre) dont les plantes ont des besoins élevés et qui sont absorbés en grandes quantités ;
- les **micronutriments** dont les plantes ont tout autant besoin mais qui sont absorbés en petites quantités (calcium, magnésium...), voire en très petites quantités (cobalt, bore...).

La nutrition minérale des végétaux n'est pas le seul aspect concernant les nutriments. En effet, ils sont utiles aux micro-organismes et sont aussi des substances éventuellement polluantes à l'égard de l'air et des eaux (*clé n° 8*).

Biodisponibilité des nutriments et quantités biodisponibles

Pour être absorbés, les nutriments doivent nécessairement être à l'état dissous sous forme ionisée ou complexée pour certains métaux. La solution du sol est une plaque tournante de la dynamique des nutriments et c'est pourquoi sa composition chimique et ses variations ont une grande influence sur la nutrition minérale des végétaux. Cela permet aussi de comprendre les conséquences de pratiques culturales comme la fertilisation et l'épandage d'amendements.

Le passage à l'état dissous est nécessaire pour que les nutriments soient biodisponibles (notion de biodisponibilité). Les variations de leur concentration, donc de leur quantité biodisponible, sont le résultat de plusieurs processus qui concourent à l'enrichissement (*figure 7.1a*) ou à l'appauvrissement de la solution du sol (*figure 7.1b*). Toutefois, les nutriments ne sont pas tous concernés par les mêmes phénomènes (*tableau 7.1*).

Figure 7.1a Les sources internes et externes au sol d'enrichissement de la solution du sol

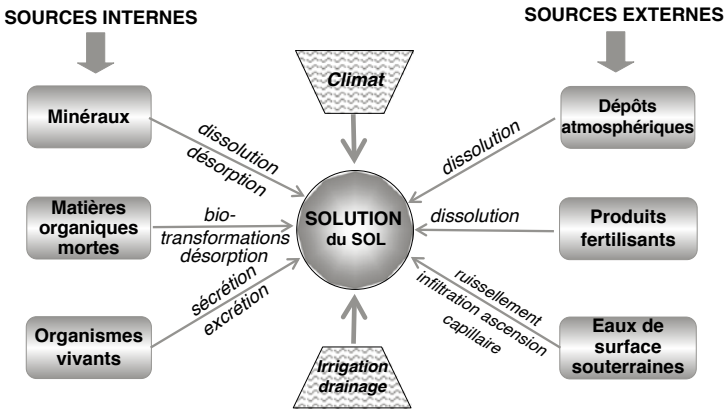
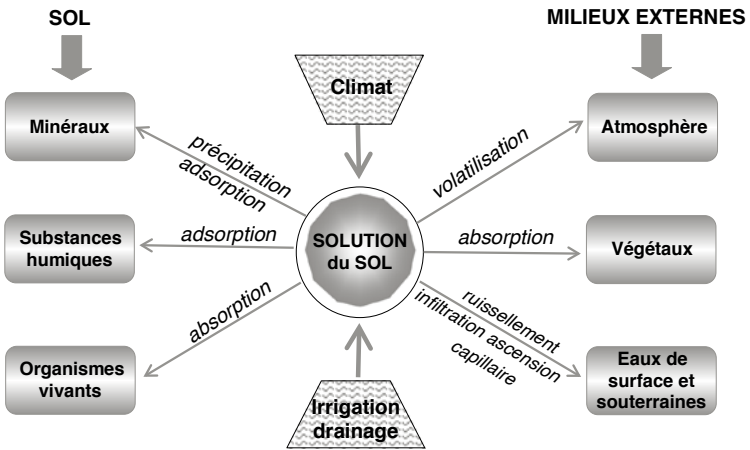


Figure 7.1b Les causes d'appauvrissement de la solution du sol



Les processus impliqués sont indiqués en caractères italiques dans les deux figures.

Par les apports ou les retraits d'eau, le climat, l'irrigation et le drainage font varier les concentrations de la solution du sol sans apports de nutriments sauf pour l'irrigation fertilisante et les dépôts atmosphériques dus aux précipitations.

Tableau 7.1 Processus, autres que les apports, à l'origine d'une augmentation et d'une diminution de la concentration de la solution du sol pour les principaux nutriments

Nutriments	Types de processus	Causes des variations des concentrations	
		À l'origine d'une augmentation	À l'origine d'une diminution
<i>Cation ammonium</i>	Biotransformation	Minéralisation de l'azote organique	Absorption/assimilation*
	Physicochimique	Ionisation par protonation de l'ammoniac quand $\text{pH} < \approx 7$	Formation d'ammoniac par perte d'un proton et volatilisation
		Désorption par échanges de cations	Adsorption par échanges de cations
<i>Anion nitrate</i>	Biotransformation	Nitrification	Absorption/assimilation* Dénitrification
	Physicochimique**		
<i>Anions orthophosphates</i>	Biotransformation	Minéralisation du phosphore organique	Absorption/assimilation*
	Physicochimique	Ionisation de l'acide phosphorique Désorption par échange d'anions et par échange de ligands Dissolution des phosphates	Fixation de protons Adsorption par échanges d'anions et par échanges de ligands Précipitation des phosphates.
<i>Anion sulfate</i>	Biotransformation	Minéralisation du soufre organique	Absorption/assimilation*
	Physicochimique**	Dissolution des sulfates	Fixation de protons Réduction des sulfates Précipitation des sulfates
<i>Métaux (calcium, magnésium, fer...)</i>	Biotransformation		Absorption/assimilation*
	Physicochimique	Dissolution des minéraux Désorption par échanges de cations	Précipitation Adsorption par échanges de cations

* Absorption et assimilation par les végétaux et les micro-organismes.

** La rétention des anions nitrate et sulfate par les constituants du sol est très limitée en raison de leurs charges électriques négatives à l'origine d'une répulsion par les surfaces des minéraux et des matières organiques.

Les quantités de nutriments biodisponibles sont le résultat de l'action des processus précédemment énumérés. Elles peuvent être décrites et quantifiées sur des périodes de différentes durées selon les buts poursuivis : de la minute à l'heure ou au jour pour les études de mécanismes physiques, physicochimiques et biologiques ; du mois à l'année pour le choix des modalités de la fertilisation et plus encore pour la gestion des écosystèmes.

On conçoit que la prévision de ces quantités soit difficile d'autant que les connaissances des vitesses des phénomènes impliqués ne sont souvent que partiellement connues. Leur estimation est néanmoins nécessaire du point de vue agronomique et environnemental tant pour prévoir leur importance que pour connaître l'influence des propriétés du sol, du climat, des pratiques et des techniques culturales ou de gestion des écosystèmes. Deux groupes de processus sont intéressants à cet égard pour décrire et comprendre les relations entre ces phénomènes et la nutrition minérale des végétaux. Il s'agit des biotransformations et de la rétention (*tableau 7.1*). Un autre aspect impliquant les mêmes phénomènes est tout aussi intéressant : les pertes de nutriments dans l'air et les eaux (*clé n° 8*).

Les biotransformations relatives aux nutriments

Elles ont un double rôle à l'égard de la solution du sol en conduisant à leur enrichissement ou au contraire à leur appauvrissement, ce qui affecte évidemment de façon différente la nutrition minérale des végétaux.

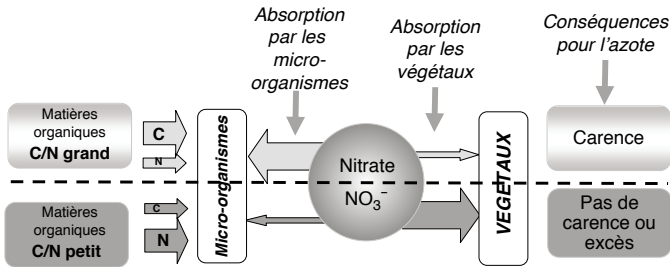
La minéralisation est probablement une des plus importantes biotransformations des éléments chimiques présents sous formes organiques dans le sol. Elle produit des anions orthophosphates et sulfates ainsi que de l'ammoniac, ce dernier composé étant rapidement transformé en anion nitrate par la nitrification. C'est une source de nutriments qui s'ajoute aux apports d'engrais minéraux. Tous les facteurs qui agissent sur la quantité de matières organiques du sol et sur leur minéralisation ont donc nécessairement une influence sur la composition de la solution de sol, le plus souvent en augmentant la concentration des nutriments.

L'appauvrissement de la solution du sol est dû à des réactions chimiques comme la dénitrification et à l'absorption des nutriments nécessaire à la production de composés organiques microbiens et végétaux. La dénitrification est une réaction de réduction de l'anion nitrate qui produit entre autres du protoxyde d'azote et de l'azote moléculaire. Elle est favorisée dans les milieux peu aérés et acides.

Les réactions de synthèses organiques dans les cellules microbiennes et végétales transforment les formes inorganiques des éléments nutritifs en formes organiques et contribuent ainsi à l'appauvrissement de la solution du sol. Elles créent dans le sol une situation de compétition entre les végétaux et les micro-organismes pour la satisfaction de leurs besoins en macro- et microéléments et pour la production de biomasse. Leurs conséquences agronomiques et

environnementales peuvent parfois être dommageables surtout en ce qui concerne l'azote. En effet, les plantes absorbent l'azote principalement sous forme d'anion nitrate, très peu sous les formes nitrite et ammoniacale de sorte qu'il peut s'établir une compétition pour ce nutriment. Pour en comprendre les conséquences, il faut comparer la quantité d'azote nitrique présente dans le sol, compte tenu des apports externes au sol et de la minéralisation, aux besoins estimés des cultures et des micro-organismes (figure 7.2). On peut ainsi faire apparaître, selon la teneur en azote des matières organiques, des situations possibles de risques de carence en azote nitrique pour les végétaux ou d'excès d'anion nitrate susceptibles de polluer les eaux. Tous les facteurs qui agissent sur l'intensité et la vitesse de minéralisation des matières organiques et sur l'activité des micro-organismes ont évidemment des effets sur cette compétition entre végétaux et micro-organismes et sur ses conséquences.

Figure 7.2 Influence du rapport C/N sur l'absorption de l'anion nitrate par les micro-organismes et les végétaux



La largeur des flèches indique approximativement l'importance relative des quantités mises en jeu lors de l'absorption par les végétaux et les micro-organismes.

Quand les matières organiques sont pauvres en azote (rapport C/N élevé), les micro-organismes prélèvent plus d'anion nitrate dans la solution du sol pour les besoins de leur métabolisme, cela au détriment des végétaux. Au contraire, quand les matières organiques sont riches en azote, les micro-organismes n'appauvrissent pas la solution du sol en prélevant peu d'anion nitrate, d'où la satisfaction des besoins des végétaux mais aussi l'existence d'excès possibles, sources de pollution des eaux.

L'immobilisation des nutriments

L'immobilisation des nutriments dans le sol est due aux phénomènes de rétention et de précipitation qui les enlèvent de la solution du sol pour les associer aux constituants de la phase solide. Au contraire, d'autres phénomènes sont à l'origine de passages inverses et concourent ainsi à leur mobilisation (*figures 7.1 et tableau 7.2*).

Tableau 7.2 Phénomènes impliqués dans l'immobilisation et la mobilisation des nutriments

Passage sur la surface de la phase solide à partir de la solution du sol

IMMOBILISATION

Passage dans la solution du sol à partir de la surface de la phase solide

Immobilisation		Mobilisation	Nutriments concernés
Rétention par les constituants du sol	Adsorption par échange d'ions*	Désorption par échange d'ions	Ammonium, métaux (potassium, calcium...)
	Adsorption par échange de ligands**	Désorption par échange de ligands	Anions orthophosphates, fer, cuivre...
	Diffusion moléculaire dans les micropores	Diffusion moléculaire dans les micropores	Tous les nutriments
Précipitation		Dissolution	Anions orthophosphates, métaux (cadmium, plomb...)

*Adsorption par échange d'ions : rétention des cations par des surfaces portant des charges électriques négatives ; rétention des anions par des surfaces portant des charges électriques positives.

**Adsorption par échange de ligands : rétention par des réaction de complexation avec des atomes ou des groupes chimiques situés sur les surfaces de la phase solide du sol.

L'environnement humain est exposé à de nombreuses menaces conduisant à des dégradations plus ou moins importantes qui concernent les organismes vivants, l'atmosphère, les eaux et les sols. Il est donc nécessaire de connaître les effets des diverses utilisations pour limiter leur nocivité, voire la supprimer. Cette connaissance repose, entre autre, sur la compréhension des fonctionnements physique, chimique et biologique du sol et des fonctions qui en découlent.

C'est l'objet de ce guide qui en trace les principaux aspects le plus simplement possible. Il est destiné à tous les publics, particulièrement aux acteurs des secteurs professionnels en relation avec l'agriculture et les problématiques environnementales. Il s'adresse, bien entendu, également aux étudiants des filières générales et techniques.

1. Le sol est un milieu poreux
2. Des ions et des molécules non ionisées sont immobilisés et mobilisés dans le sol
3. Des organismes vivants sont présents dans le sol
4. Des transports de matières ont lieu dans le sol
5. Le sol est le siège de transformations chimiques
6. Le sol est un réservoir d'eau pour les organismes vivants
7. Le sol est une source de nutriments pour les végétaux
8. Le sol influence la qualité de l'air et des eaux
9. Le sol est un milieu menacé
10. Les pratiques culturales et les fonctionnements du sol

— **Raoul Calvet** est ingénieur agronome, docteur ès sciences physiques et ancien professeur de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon.