

FRANCIS BUCAILLE

# REVITALISER LES SOLS

DIAGNOSTIC, FERTILISATION, NUTRIPROTECTION

2<sup>e</sup> édition

DUNOD

### NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

# REMERCIEMENTS

---

Merci à tous ces auteurs, penseurs, agronomes vivants ou disparus qui ont participé à la construction de la science agronomique et de ma propre vision, avec une mention particulière à Neal Kinsey qui m'a accompagné avec générosité et bienveillance.

De la reconnaissance aussi à tous mes collègues agriculteurs qui par leurs observations, leur pertinence et leur audace m'ont permis de progresser. Une grande partie de ce qui est relaté ici n'est que la compilation du partage généreux de leurs découvertes. Trente d'entre eux, mes « Fermes références » en France et en Belgique, céréaliers, éleveurs, producteurs de fruits et légumes, viticulteurs, ont été des contributeurs exceptionnels. Qu'ils soient remerciés pour leurs contributions passées, présentes et – je compte sur eux – à venir. Ils se reconnaîtront dans cette adresse collective.



## MOT DE L'AUTEUR

---

Le monde change, les sciences évoluent, la conscience de l'urgence climatique est grandissante, les défis à relever par les agriculteurs sont devenus immenses, beaucoup d'outils ne sont plus disponibles (retrait de molécules) ou plus du tout adaptés (OAD de fertilisation, programmes de protection, méthodologies expérimentales). Il était nécessaire d'actualiser quelques données et d'apporter des outils à valeur d'usage encore plus pertinents. C'est pourquoi nous avons décidé de compléter la première version de cet ouvrage paru en 2020. Nous trouverons, par exemple, un inventaire décrivant, autant que la science nous le permet aujourd'hui, la corrélation entre les adventices et les déséquilibres minéraux, de manière à pouvoir envisager des programmes de lutte encore davantage basés sur la « diététique » du sol et des cultures. Ou encore la description de biotests qui ont pour avantage de mieux appréhender le vivant et d'en saisir plus finement les complexités. Changer de pratiques et de paradigme nécessite de changer d'indicateurs. Ces connaissances encore imparfaites et incomplètes permettront aux pionniers de l'agriculture d'explorer des voies d'avant-garde complémentaires de pratiques déjà bien rodées qui sont les piliers majeurs de l'agriculture régénérative : assolements diversifiés, non-travail du sol et couverts végétaux. L'agriculture du XXI<sup>e</sup> siècle ne sera pas le fait de molécules miracle, mais d'agrosystèmes réfléchis et cohérents. C'est sur cette certitude que s'appuient les nouveaux développements de cette réédition.

Bonne lecture

Francis Bucaille



# TABLE DES MATIÈRES

---

Préface	XVII
Avant-propos	XIX
Introduction ● Des épis de blé en or	1
Des solidarités dans les sols	2
Un Internet de la nature	3
Les échanges sont souverains également dans les systèmes cultivés	3
Un microbiote des feuilles	4
Une résilience incroyable	5
Les sols ne sont pas morts	5

## A

---

### Une « renaissance » agricole à construire

1 ● La segmentation du savoir	9
1.1 Forces et faiblesses de la segmentation de la science	9
1.1.1 Une spécialisation féconde des activités humaines	9
1.1.2 Des déconnexions malheureuses	10
1.1.3 Une prise de conscience aujourd'hui à l'œuvre	11
1.1.4 Un nouveau schéma à construire qui respecte les savoirs d'aujourd'hui	12
1.2 Limites de la segmentation agricole : le « tout » est plus que l'ensemble des parties	13
1.2.1 La science a divisé le tout en chacune de ses parties	13
1.2.2 Un exemple : la surfertilisation systématique des blés-sur-blés	13
1.2.3 Conclusion	15

<b>2 ● Refaire le lien entre fertilité et santé des plantes</b>	<b>17</b>
2.1 Les « cides » ont un impact sur les résistances naturelles des sols	17
2.2 Les « cides » ont parfois des effets « positifs » transitoires dans les sols	18
2.2.1 Les « cides » créent de la fertilité de façon transitoire	18
2.2.2 Une décapitalisation à l'œuvre	18
2.2.3 Conclusion	19
2.3 Trophobiose : des plantes programmées sensibles ou résistantes	19
2.3.1 Un nouveau regard sur les pullulations de ravageurs	19
2.3.2 Des plantes protégées par leurs protéines et leurs sucres complexes	20
2.3.3 Le taux de sucre, un bon indicateur de protection	21
2.3.4 La trophobiose appliquée aux maladies cryptogamiques : exemple de l'Esca de la vigne	21
2.3.5 Le Brix comme indicateur de la santé des plantes	22
2.3.6 Une nouvelle interprétation de l'efficacité des infradoses de sucre	26
2.3.7 Des leviers multiples de « nutriprotection »	26
2.3.8 Des plantes malades de nos pratiques	27
2.4 L'avantage concurrentiel sur les adventices	28
2.4.1 Limiter les dépenses de la plante par la gestion du redox	28
2.4.2 Rééquilibrer les sols	29
2.4.3 Pesticides : conserver une trousse d'urgence	30
<b>3 ● Pour une approche holistique (globale) des sols et de l'agriculture</b>	<b>31</b>
3.1 Naissance de l'agriculture holistique	31
3.2 Une révolution copernicienne nécessaire	32
3.2.1 La vision ptolémaïque : le rendement comme seul point de repère	32
3.2.2 La vision copernicienne : le sol vivant au centre du système	34
3.3 Des freins à lever	35
3.3.1 Trouver de nouveaux modes opératoires	35
3.3.2 Sortir de la recherche en micro-parcelles pour être capable de mesurer l'effet « sol vivant »	36
3.3.3 Prendre en compte la relativité des phénomènes	39
3.3.4 Des modèles végétaux à élargir	40
3.4 Les nouvelles formes d'agriculture, elles aussi doivent faire leur révolution copernicienne	41
3.4.1 L'agriculture de conservation ou régénérative	42
3.4.2 Le biocontrôle : avancée ou « prolongement vert » d'une vision défensive ?	42



3.5	Le risque est de faire du neuf avec du vieux	43
<b>4 ●</b>	<b>Sortir d'une vision simplifiée de la fertilité des sols</b>	<b>45</b>
4.1	Des engrais pas si complets	45
4.2	Le bilan : une modélisation sur la base de besoins mal évalués et d'un volume de sol sous-estimé	46
4.2.1	Un enracinement de surface	46
4.2.2	Des réservoirs de fertilité	47
4.2.3	Une forfaitisation des pertes	47
4.2.4	Des fonctions secondaires des fertilisants souvent méconnues	48
4.2.5	Les nitrates ne voyagent jamais seuls	50
4.3	Une relation entre pH et calcium souvent mal comprise	51
4.3.1	La gestion du pH du sol	51
4.3.2	Des acidifications de surface passent souvent inaperçues	51

## **B**

### Stocker du carbone : de nouvelles pistes

<b>5 ●</b>	<b>L'importance des micro-organismes</b>	<b>55</b>
5.1	Une baisse paradoxale des taux de matière organique	55
5.1.1	La mise en équation de la matière organique	55
5.1.2	Tout dépend en réalité de la nature des micro-organismes mobilisés	56
5.1.3	Des pratiques avec de bonnes intentions qui ont encore des marges de progrès	56
5.1.4	La quête du rendement nous pousse à décapitaliser toujours plus	56
5.1.5	Retrouver l'équilibre en séquestration et minéralisation	57
5.2	Importance des micro-organismes	57
5.2.1	Notions élémentaires, importance de l'activité biologique dans les sols et du recyclage des nutriments	58
5.2.2	Micro-organismes : les acteurs majeurs de la dynamique de l'humus	60
5.2.3	Importance des exsudats et de la rhizodéposition	65
5.2.4	Le ratio bactéries/champignons est décisif	65
5.2.5	Les champignons sont pénalisés par l'azote	68
<b>6 ●</b>	<b>Faim d'azote lors d'incorporation de pailles : mythe et réalités</b>	<b>69</b>
6.1	L'azote n'est pas à lui seul un facteur limitant de la décomposition	69

6.1.1	Parler de faim d'azote est souvent contestable	69
6.1.2	Pas de faim d'azote en forêt	70
6.1.3	Une faim de champignons	70
<b>6.2</b>	<b>Comment s'opère le « miracle » de la décomposition par les champignons</b>	<b>71</b>
6.2.1	C/N très élevés : le terrain de jeu des lignivores	71
6.2.2	Relocalisation de l'azote par les champignons	71
<b>6.3</b>	<b>La décomposition fongique peut être favorisée</b>	<b>72</b>
6.3.1	Quand les champignons ne peuvent plus « travailler »	72
6.3.2	La faim d'azote est aussi la conséquence de certaines pratiques	72
6.3.3	Des essais révélateurs issus de la mise en pratique de ces connaissances	73
6.3.4	Pas de faim d'azote sur des résidus laissés en surface	74
<b>6.4</b>	<b>Antagonismes entre flore d'assimilation et flore de décomposition</b>	<b>74</b>
<b>6.5</b>	<b>Des substances allélopathiques en cause</b>	<b>74</b>
<b>7 ●</b>	<b>Les engrais verts ne stockent pas durablement du carbone dans les sols</b>	<b>77</b>
<b>7.1</b>	<b>Les engrais verts ne sont pas des prairies, le ruminant fait défaut</b>	<b>77</b>
7.1.1	Un incubateur bactérien	78
7.1.2	Les ruminants lèvent la dormance des spores	78
<b>7.2</b>	<b>Les sols ne sont pas adaptés pour digérer des végétaux immatures</b>	<b>79</b>
7.2.1	Des restitutions de matériaux immatures	79
7.2.2	Des matériaux avec une faible valeur pour les constructeurs d'humus	79
7.2.3	La destruction tardive à un stade immature : le scénario pénalisant	80
<b>7.3</b>	<b>Minéralisation de l'humus stable par les plantes et donc par les engrais verts</b>	<b>81</b>
7.3.1	Le RPE : effet minéralisateur de la rhizosphère	81
7.3.2	Les cultures intermédiaires : un effet minéralisateur additionnel	82
7.3.3	Les mycorhizes et la photosynthèse activent la minéralisation par le RPE	83
<b>7.4</b>	<b>Conclusion : une tropicalisation des pratiques</b>	<b>84</b>
<b>8 ●</b>	<b>Autres pistes et conclusion</b>	<b>85</b>
<b>8.1</b>	<b>BRF et mulching : un intérêt démontré des apports de matériaux mûres</b>	<b>85</b>
8.1.1	Des pratiques peu ou pas généralisables	85
8.1.2	La forêt fonctionne avec seulement 3 t/ha de matière sèche	86
8.1.3	Les terres n'en demandent pas tant	86
<b>8.2</b>	<b>Conclusion : les saprophytes sont la clé de la construction d'humus dans les sols</b>	<b>87</b>

# C

---

## Le climax : une clé pour intensifier un agrosystème durable

<b>9 ● La productivité grâce à l'écologie appliquée</b>	<b>91</b>
<b>9.1 De nouvelles bases pour l'écologie des sols</b>	91
9.1.1 Chacun a sa place et occupe une niche écologique	91
9.1.2 Des écosystèmes rétrogradés à un état instable antérieur au climax	92
9.1.3 Un interventionnisme est obligatoire	94
<b>9.2 Gérer le décalage climacique de l'agrosystème sur son sol</b>	95
9.2.1 En région tempérée la pause végétative hivernale est nécessaire à la construction d'humus	96
9.2.2 Le travail du sol est une clé historique et moderne de bonne gestion écologique	99
<b>10 ● Prise en compte du décalage climacique pour les principaux types de cultures</b>	<b>103</b>
<b>10.1 Les céréales à paille : un décalage à maîtriser en climat tempéré</b>	103
10.1.1 Le blé est une plante exotique méditerranéenne	103
10.1.2 Des besoins en eau inférieurs et asynchrones	104
10.1.3 Bonnes pratiques pour restituer un engrais vert derrière une céréale à paille	105
<b>10.2 Le maïs, le sorgho, le tournesol, le soja, la betterave : des plantes écologiques !</b>	105
10.2.1 Une biodiversité parfois étonnante sous couvert de maïs	106
10.2.2 Pas de lixiviation des nitrates	106
<b>10.3 Équilibre écologique des cultures pérennes</b>	107
10.3.1 L'agroforesterie : un système qui entretient sa propre fertilité	107
10.3.2 Les vergers : le verrou phytosanitaire à lever	107
10.3.3 La vigne : laisser un couvert estival actif	108
10.3.4 Des céréales vivaces sources d'espoirs	108
<b>10.4 Permettre à la prairie d'entretenir son système racinaire</b>	108
10.4.1 Incidence de la coupe de l'herbe sur la photosynthèse et sur les enracinements	109
10.4.2 Prévoir un millet perlé ou un maïs à pâturer en cas de sécheresse	110
<b>10.5 Une végétation estivale active : un bienfait écologique collectif</b>	111
<b>10.6 Décompacter les esprits pour changer de paradigmes</b>	112

10.6.1	Nos projections mentales sont le levier de nos pratiques	112
10.6.2	La culture gouverne l'agriculture	113
10.6.3	Trouver le bon gouvernail	113

## **D**

---

### Approche du sol dans sa globalité : le profil de sol

<b>11 ●</b>	<b>Construction des sols et profil cultural</b>	<b>117</b>
11.1	La construction des sols : par le vivant, pour le vivant	117
11.1.1	L'histoire du sol : de la pédogénèse à la pédologie	117
11.1.2	Le rôle crucial des bactéries	117
11.1.3	Les vers de terre	118
11.1.4	Les argiles	118
11.1.5	Certains sols sont particulièrement fragiles	118
11.2	Explorer la troisième dimension des sols avec le profil cultural	120
11.2.1	Intérêt d'une approche directe en 3D	120
11.2.2	Réaliser son profil de sol	121
11.2.3	Définir son type de sol	122
<b>12 ●</b>	<b>Analyse de la fertilité biologique</b>	<b>125</b>
12.1	Évaluer l'activité de la macrofaune : fourmis, vers de terre anéciques	125
12.1.1	Enjeu : les anéciques ont un rôle majeur	125
12.1.2	Méthode d'observation	125
12.1.3	Méthode d'évaluation de la population	126
12.1.4	Analyse : des dynamiques à mettre en évidence	127
12.2	Autres types de bioturbation	128
12.3	Analyser les qualités d'enracinement	129
12.3.1	Enjeu : volume et vitesse	129
12.3.2	Méthode et analyse morphologique	129
12.3.3	Méthode et analyse de la cinétique d'enracinement	130
12.3.4	Méthode et analyse de la profondeur d'enracinement	130
12.4	Le rôle stabilisateur des pseudomycéliums ( <i>wiskers</i> en anglais)	131
12.4.1	Enjeu : les pseudomycéliums fixent les cations, préviennent l'acidification de surface et tamponnent le sol	131
12.4.2	Méthode et analyse : détecter les traces de pseudomycéliums	132
12.5	L'évolution des résidus de récolte	132

<b>13 ● Analyse de la fertilité physique</b>	<b>133</b>
13.1 Analyser la stabilité structurale de surface	133
13.2 Zones de compaction, semelles de labour et de non-labour	134
13.2.1 Zones de compactations et semelles de labour	134
13.2.2 Semelles de non-labour et couches d'aliôs	136
13.2.3 La compaction : avant tout un phénomène d'origine biologique	138
13.3 La porosité, voie respiratoire du sol	139
13.4 Les argiles : les meilleures nous quittent toujours les premières	140
13.4.1 Stabilité des argiles dans le sol	140
13.4.2 La structure profonde des sols	140
13.5 La couleur : reflet des évolutions et du fonctionnement du sol	142
<b>14 ● Analyse de la fertilité chimique</b>	<b>143</b>
14.1 Le pH	143
14.1.1 Enjeu	143
14.1.2 Méthode & analyse	143
14.2 Présence de carbonates de calcium : test à l'acide chlorhydrique	144
14.2.1 Enjeu	144
14.2.2 Méthode	144
<b>15 ● Analyse du fonctionnement hydrique</b>	<b>147</b>
15.1 Identifier les capacités d'absorption en eau d'un sol	147
15.2 Détecter des signes d'hydromorphie ou d'anoxie	148
15.2.1 Enjeu	148
15.2.2 Méthode et analyse	148
15.3 Évaluation de la fertilité hydrique	150
15.3.1 La capacité au champ	150
15.3.2 La réserve facilement utile (RFU)	151
15.3.3 La fertilité hydrique et la matière organique	151
<b>16 ● Les tests pour appréhender le sol vivant</b>	<b>153</b>
16.1 Le test de germination du cresson alénois	153
16.2 Le test de toxicité herbicide avoine et tournesol	154
16.3 Le test de nocivité sur les vers de terre	155
16.4 Le test de mycorhization d'un sol ou d'un support de culture	156

16.5	Le test d'impact sur la microbiologie générale ou ciblée des sols	156
16.6	Le test d'évaluation d'équilibre bactéries/champignons	157
16.7	Les adventices comme bioindicateurs de la fertilité des sols	158
<b>17 ●</b>	<b>Quelques pistes d'amélioration des fertilités biologique, physique, chimique et hydrique</b>	<b>165</b>
17.1	Fertilité biologique : restaurer l'équilibre microbiologique	165
17.1.1	Méthodologie. Comment établir une ration pour le sol ?	165
17.1.2	Avantages attendus	166
17.1.3	Ensemencement ou ciblage d'une flore microbienne utile	166
17.1.4	Optimisation des diazotrophes	167
17.1.5	Favoriser les mycorhizes	167
17.1.6	Alléger les programmes fongicides	168
17.1.7	Couverts végétaux	169
17.2	Leviers pour améliorer la physique du sol	169
17.2.1	Des labours agronomiques	169
17.2.2	Le sous-solage – fissurateur – décompacteur	170
17.3	Une approche plus globale pour la fertilité chimique	172
17.3.1	Une grille de décision élargie pour les corrections minérales	172
17.4	Fertilité hydrique : comment l'optimiser ?	172
17.4.1	Par les opérations mécaniques	172
17.4.2	Par les équilibres Ca/Mg	173
17.4.3	Par la reconstitution des taux d'humus	173
17.4.4	Par la fertilité biologique	173

## **E**

### Restoration de la fertilité des sols

<b>18 ●</b>	<b>Analyses de sols : comment en tirer le meilleur parti</b>	<b>177</b>
18.1	Objectif et méthodes pour des analyses pertinentes	177
18.1.1	Méthode : prendre en compte et limiter les biais	177
18.1.2	Adopter de bonnes pratiques d'échantillonnage	178
18.1.3	Cas particuliers : TCS et semis direct	178
18.1.4	Un échantillon profond selon les situations pédologiques	179

<b>18.2 Les outils d'évaluation majeurs : mesure de la CEC, pH et MO</b>	<b>180</b>
18.2.1 Définition introductive de la CEC	180
18.2.2 Méthode d'évaluation en laboratoire	182
18.2.3 Le pH eau et le pH KCl	183
18.2.4 La matière organique	184
<b>18.3 Conclusion</b>	<b>185</b>
<b>19 ● La fertilisation</b>	<b>187</b>
<b>19.1 Principes de base</b>	<b>187</b>
19.1.1 La loi de l'optimum : l'excès de l'un est le facteur limitant des autres	187
19.1.2 Règle d'universalité	188
19.1.3 Le choix des bonnes formes d'engrais et l'intégration de tous les éléments qui les composent	188
19.1.4 Le choix des amendements ne doit pas être dicté par le pH	189
19.1.5 Nourrir le sol avant de nourrir la plante	189
<b>19.2 La CEC, premier poste de commandes de la fertilisation</b>	<b>190</b>
19.2.1 Le sol idéal retient 25 % d'air et 25 % d'eau	190
19.2.2 Piloter la porosité du sol par la CEC	191
19.2.3 Qualités des principaux cations de la CEC	193
<b>20 ● Pilotage des amendements et des engrais</b>	<b>195</b>
<b>20.1 Le pilotage du calcium (Ca) prévaut pour rééquilibrer la CEC</b>	<b>195</b>
20.1.1 Le pH équilibré est la résultante du sol vivant	195
20.1.2 Le besoin en calcium prévaut sur le pH pour décider d'un amendement	196
20.1.3 Scénarii de pilotage des amendements calciques	196
20.1.4 Le calcium interfère aussi avec de nombreux autres oligo-éléments	200
<b>20.2 Prise en compte des autres minéraux</b>	<b>200</b>
20.2.1 Le magnésium (Mg)	200
20.2.2 Le soufre (S)	201
20.2.3 L'azote (N)	201
20.2.4 Le phosphore (P)	203
20.2.5 Le potassium (K)	205
20.2.6 Le bore (B)	206
20.2.7 Les chlorures (Cl)	207
20.2.8 Le cobalt (Co)	207
20.2.9 Le cuivre (Cu)	207

20.2.10	Le fer (Fe)	207
20.2.11	Le manganèse (Mn)	208
20.2.12	Le molybdène (Mo)	208
20.2.13	Le zinc (Zn)	209
<b>20.3</b>	<b>Zones de confort et zones d'intervention</b>	<b>209</b>
<b>20.4</b>	<b>Pilotage de la fertilisation organique</b>	<b>210</b>
<b>20.5</b>	<b>En résumé : un pilotage de la fertilisation chimique en cinq étapes</b>	<b>211</b>
<b>21 ●</b>	<b>Revitalisation des sols en 7 étapes</b>	<b>213</b>
21.1	Restaurer la verticalité du sol : identification de semelles de labour ou de non-labour	213
21.2	Restauration du ratio des cations sur la CEC	213
21.3	Apporter les autres minéraux nécessaires aux enzymes du sol	214
21.4	Réintroduire les familles de micro-organismes qui peuvent faire défaut	214
21.5	Couvrir le sol en mimant le mieux possible le climax originel	214
21.6	Activer la flore fongique humificatrice du sol	214
21.7	Réduire, voire supprimer tous les fongicides de fin de cycle – Pratiquer la nutriprotection	215
<b>Conclusion</b>		
<b>L'homme est vivant quand la terre est vivante</b>		<b>219</b>
L'Homme, maillon dépendant des écosystèmes		219
Les agriculteurs ont une place particulière à prendre		220
Redonner confiance aux agriculteurs		220
L'homme est vivant quand la terre est vivante		221
Pour une écologie agricole de tous les hectares et de tous les hommes		221
L'utilisation intensive et renouvelable des ressources fait partie des écosystèmes		222
La revitalisation des sols est un enchaînement vertueux et économe		223
<b>Bibliographie</b>		<b>225</b>
<b>Index</b>		<b>231</b>



# PRÉFACE

---

## Pour soigner ces sols que nous devons à nos enfants

Majeure partie de la biodiversité terrestre, je gouverne les cycles de la matière, je suis source de l'alimentation et je joue avec l'effet de serre, qui suis-je ?

Le sol. Plus que le support de nos pas ou le support des plantes : un lieu de vie intense. Un gramme de sol héberge plus d'un milliard de bactéries, de plusieurs milliers d'espèces différentes ; il compte aussi 1 à 100 milliers d'espèces de champignon... Les bactéries des sols de France comptent au moins 115 000 espèces, à comparer à 570 oiseaux, 6 500 plantes ou 189 mammifères ! Avec 50 % de la biomasse vivante, 23 % des espèces vivantes connues et 75 % de la matière organique terrestre, le sol est l'écosystème terrestre : ce que nous voyons en surface n'en est qu'un diverticule !

La vie crée le sol : elle dégrade la matière organique pour en recycler les éléments ; elle attaque la roche pour libérer la fertilité ; elle exploite l'atmosphère dont l'azote gazeux est notamment transformé par des bactéries en azote organique. La vie brasse le sol, entre mouvements animaux et remontées d'éléments prélevés en profondeur par les plantes. Bien plus : 90 % des plantes ne survivent pas sans les champignons dits « mycorhiziens » qui, d'un côté, cherchent des ressources dans le sol et, d'un autre, colonisent les racines auxquelles ils prodiguent les minéraux collectés dans le sol. Longtemps vu comme une interface entre la géosphère et l'atmosphère, le sol est non seulement un écosystème mais surtout un processus vivant.

Les sols font le monde. Leur fertilité emportée par les eaux nourrit les océans, expliquant pourquoi les eaux proches des continents sont les plus productives (même la pêche vient des sols !). Les organismes des sols émettent des gaz à effet de serre : CO<sub>2</sub> issu de la respiration de sols aérés, méthane et protoxyde d'azote issus des sols anoxiques réchauffent la planète... Inversement, des sols raisonnablement aérés ne dégradent que lentement la matière organique : une solution simple contre l'effet de serre est d'enfouir nos déchets organiques dans les sols. Augmenter de 0,4 % par an la teneur en matière organique dans les sols stockerait l'équivalent de nos émissions annuelles de CO<sub>2</sub>.

Tristement, l'Homme n'y a pas compris cela. Les aménagements et l'urbanisation recouvrent les sols d'un département tous les 7 à 10 ans en France. La salinisation menace 30 % des sols agricoles, car l'irrigation amène des sels qui s'accumulent. Le labour ramène la fertilité en surface, aère le sol et désherbe nos champs mais... sa

pratique inconsidérée (récurrente et profonde) nuit à long terme. En revanche, pratiqués d'automne et sans couverts végétaux, ils dopent l'érosion hivernale des sols nus, à la structure exposée, où la matière organique, oxydée, ne fait plus la cohésion : nos sols labourés s'érodent en moyenne dix fois plus qu'avant la charrue.

Les sols s'endommagent à leur rythme, un rythme lent, mais certain. Il faut cent à mille ans pour faire un sol... Nous réalisons donc mal qu'ils sont un patrimoine qu'on ne peut remplacer. Nous héritons les sols de nos ancêtres et nous les devons à nos enfants ; nous avons le devoir moral de n'en utiliser que les intérêts : un usufruit.

Vision catastrophiste et moraliste ? Non, point du tout, car justement le livre qui suit offre des solutions et des actions. La promesse que remplit cet ouvrage est de relier reconnaissance de la logique de vie du sol et pratique de terrain. Nous sommes obligés, dans nos aménagements, de toucher aux sols et de les modifier, il en va de la nutrition de l'humanité. Il nous faut donc des solutions pratiques et réalistes pour le faire en respectant la dynamique propre des sols et leur durabilité, pour les rendre plus fertiles et résilients.

Ensemble, agriculteurs, agronomes et citoyens, consommateurs ou décideurs, prenons en main le sol et son écologie comme des leviers pour soulever l'avenir. C'est action citoyenne que de le faire, une action qui ne peut être que collective. Souvenons-nous de toujours nous questionner, car nulle pratique n'est dénuée d'effet secondaire, nul impératif ne vaut pour toujours sans l'épreuve des faits : pilotons ensemble, attentifs à chaque instant, l'avenir de nos sols. Et commençons par lire les lignes qui suivent, où Francis nous montre le chemin, et les premiers pas que l'état actuel des connaissances recommande...

Marc-André Selosse  
Professeur du Muséum national d'Histoire naturelle  
Professeur aux universités de Gdansk (Pologne) et Kunming (Chine)  
Membre de l'Académie d'agriculture de France

## AVANT-PROPOS

---

Toutes les solutions imaginées par le vivant ont subi l'épreuve du temps, ce qui leur donne à ce titre toute leur légitimité. La Vie est apparue sur Terre sans doute sous forme d'une bactérie et ces briques originelles du vivant sont encore présentes dans la biologie contemporaine. Depuis, la Vie s'est complexifiée et a appris à respirer, à nager, à voler, à communiquer, à fabriquer des matériaux aux qualités incroyables et encore inégalées. En tant qu'agriculteur, ce constat force l'humilité. Il s'agit pour nous d'accepter de passer d'un statut « d'exploitant agricole » à celui de « fermier de la Nature ». « Exploitation » a comme signification dans le dictionnaire des synonymes : extraction, usage abusif, prélèvement, dans les stocks de la Nature et de la planète, sans contrepartie équilibrée. Alors que nous sommes son obligé, son « fermier ». Le fermage sous-tend la notion d'échanges et obligations pour l'Homme, pour l'agriculteur envers la Nature, obligation d'entretien, de « Mesnage des champs » dans ce « Théâtre d'agriculture » du XXI<sup>e</sup> siècle (O. de Serres, *Le théâtre d'agriculture et mesnage des champs*, 1600). Cela signifie que la Terre ne nous est que louée, prêtée moyennant une contrepartie de respect et de bon entretien. Nous ne « faisons pas pousser » les plantes. En fait, elles acceptent de pousser dans les conditions choisies par l'Homme en des endroits choisis par l'Homme. Culturellement, nous sommes habitués depuis des siècles à imposer, à dominer la Nature, voire de manière si présomptueuse, à l'améliorer. Le mystère de la vie s'est résumé pour certains à une double hélice en couleur balisée de codes ACGT (les bases azotées de l'ADN) désormais décryptés. Depuis quelques dizaines d'années, l'Homme s'est mis à « tripatouiller » son génome, en se donnant parfois même l'illusion de participer à la création de la Vie. Ce sentiment de toute-puissance doit aujourd'hui laisser la place à une culture scientifique écologique qui ne place plus l'homme au sommet de la pyramide du vivant, mais de façon plus réaliste comme un maillon qui lui est dépendant. Alors nous pourrions cesser de nous focaliser sur le spectaculaire. Alors nous pourrions nous pencher sur les choses d'une apparente insignifiance. Alors nous pourrions nous pencher sur la vie des sols.

Pendant des millions d'années, l'homme a eu un impact limité sur la Terre et c'était le respect face à la Nature qui prévalait. Il était courant dans beaucoup de civilisations de demander pardon à la Nature déifiée, avant de sacrifier un animal ou d'abattre un arbre. La Nature était vue comme une divinité, un tout, Gaïa, et il était impensable de couper les cheveux de cette déesse (la forêt), ni de pénétrer

dans ses entrailles (extraction minière). La Révolution industrielle et la Science ont totalement désacralisé cette relation quasi mystique. La Nature a été résumée à un assemblage d'atomes, à des réactions chimiques, à des processus enzymatiques et dépouillée de son essence sacrée. La voie était ouverte pour une exploitation décomplexée et débridée. C'est ainsi que l'Homme, l'agriculteur, vise à affirmer son intelligence et sa suprématie sur le reste de toutes les autres formes de vie en inventant ses propres solutions ; solutions que pourtant, bien souvent, la Vie a déjà imaginées de manière plus élégante, plus économique, plus efficace et plus durable. L'Homme commencera à entrevoir les bonnes solutions lorsqu'il effacera de son imaginaire sa propre représentation, si souvent reprise, même dans les ouvrages scientifiques du XIX<sup>e</sup> et du XX<sup>e</sup> siècles, trônant en haut de la pyramide du vivant. Le monde est circulaire, pas linéaire. Tout ce que l'Homme possède, consomme, mange, construit, même en plein cœur de ville lui est fourni par l'entremise de son écosystème. Le pétrole, le charbon, le minerai transformé en acier, le quartz fondu en verre ne sont que du concentré d'énergie solaire transformée en énergie chimique grâce à la photosynthèse. Sans cette merveille qu'est la chlorophylle, rien n'existerait. Sa survie dépend totalement de ce qu'il pense avoir le droit de maltraiter. Arrêter, comme disait Rabelais, « de péter plus haut qu'il n'a le cul » lui permettra d'observer, puis de comprendre et enfin de respecter pour son plus grand profit les écosystèmes.

Que pouvons-nous apprendre de la longue histoire de la Vie ? Pendant des millénaires, le sol s'est auto-entretenu, autorecyclé en équilibre avec la flore, la faune, le microbiote et le climat. Steppes, savanes, prairies, forêts ou encore mangroves... Ces biocénoses<sup>1</sup> se sont développées de façon harmonieuse et continue sur l'ensemble de la terre. Leur production de biomasse annuelle est souvent impressionnante (jusqu'à 30 tonnes de matière sèche par hectare et par an). Par ailleurs la complexité de ces écosystèmes n'induit pas de fragilité, mais bien au contraire de la résilience, de la stabilité et une santé insolente. La maladie et le parasitisme y sont confinés à des niches écologiques très étroites. On ne peut qu'être admiratif devant cette symphonie jouée sans ratés par des milliards de micro-organismes, des millions d'insectes, des centaines de végétaux différents, où la règle est la communication, la collaboration et l'évolution adaptative : l'intelligence du vivant en pleine action !

Si les forêts primaires semblent encore fonctionner dans un cycle permanent sur ce modèle, que s'est-il passé avec nos sols agricoles ou forestiers qui ne cessent de s'appauvrir et de perdre leur faune endogée surtout depuis ces soixante-dix dernières années ? Quelles que soient les latitudes, quels que soient les systèmes de production, partout l'action des hommes a les mêmes effets et les mêmes causes communes. Partout la fertilité et la santé des plantes sont mal comprises. La volonté d'écrire ce livre est ainsi d'abord née de ce constat, de la nécessité d'expliquer pourquoi certaines voies sont devenues sans issue et de proposer les bases d'un nouveau modèle

---

1. Biocénose : ensemble des organismes vivants (animaux, végétaux, champignons, bactéries, etc.) coexistant au sein d'un milieu donné, le biotope. L'écosystème correspond à l'ensemble formé par la biocénose et son biotope.

bio-inspiré c'est-à-dire incluant de façon holistique<sup>1</sup> l'intelligence naturelle des écosystèmes. Notre carte mentale nous a conduits jusqu'alors à inventer alors qu'il reste tant à découvrir dans ce que la Nature a déjà testé et résolu. Nous nous devons de mieux connaître les rouages de la vie, du sol, de la chaîne trophique non pas pour mieux contrôler et améliorer, mais pour mieux respecter ses lois, nous permettre d'intégrer au mieux notre présence et notre activité dans cet atelier. **Cette science appelée écologie et cette méthodologie appelée biomimétisme, consistent à regarder humblement le génie de la vie.** C'est ce à quoi nous vous invitons. C'est la condition nécessaire si nous voulons réussir le virage de la deuxième révolution verte mais également si nous voulons prétendre pouvoir répondre aux enjeux de l'économie des exploitations agricoles, du climat, du stockage de carbone dans les sols, du maintien de la biodiversité et plus largement de la santé humaine.

Pourquoi les plantes cultivées seraient-elles obligatoirement malades alors que les écosystèmes naturels ne le sont jamais ? Pourquoi les prairies sont-elles asséchées en été tandis que les bords de route sont toujours verts ? Pourquoi les terres sont-elles si fertiles après une jachère cultivée ou une prairie ? Et pourquoi cette fertilité devrait-elle obligatoirement s'éteindre au fil des années ? Pourquoi en tant qu'agriculteur devrions-nous nécessairement nous passer des services que la nature offre par ailleurs gratuitement au sein des écosystèmes ? Le caractère perçu comme inéluctable, « normal » de ces évidences, fait que ces questions tellement élémentaires paraissent incongrues. Pourquoi ? Parce que durant les soixante-dix dernières années nous ne nous sommes préoccupés que de la production « maximisée » des plantes cultivées. Le rendement nous a aveuglés sur les fonctions biologiques des sols et la fertilité des sols en général. Des « outsiders » clairvoyants de la première révolution agricole ou des pionniers de la deuxième vague, avaient pourtant dès l'après-guerre souligné l'importance des grands équilibres écologiques ou minéraux du sol. Ce sont des chercheurs et des agriculteurs comme Allan Savory, Masanobu Fukuoka, André Voisin, Hans Peter Rusch, Francis Chaboussou, William Albrecht, Kathy Voth, Neal Kinsey... et bien d'autres. Ces voix ont été jusqu'à présent trop peu entendues. La réflexion proposée dans l'ouvrage que vous tenez entre les mains est aussi le fruit de la lecture féconde de ces auteurs dont les courants agronomiques ont été injustement oubliés en cédant à l'illusion d'une productivité croissante et pérenne. L'urgence a pris le pas sur l'important !

Dans une société de plus en plus hystérisée sur toutes les questions de société, l'agriculture et l'écologie ne sont pas épargnées. Trop souvent, devant l'horreur, nous fermons les yeux et nous crions : « Assez ! », exigeant des mesures pour résoudre le mal. Or certains problèmes demeurent sans solution... En tout cas, sans solution unique, analyse et théorise parfaitement l'écrivain français et philosophe Éric-Emmanuel Schmitt. Ainsi, on comprend la nécessité d'enrayer le réchauffement climatique, mais on ne veut pas stopper la croissance. On exige des aliments sains, zéro résidus, tracés et nutritifs, mais on veut des prix alimentaires bas. On fustige les produits phytosanitaires mais on veut la sécurité de l'approvisionnement

---

1. Holistique : qui s'intéresse d'un sujet sous toutes ses dimensions en prenant en considération les interactions entre les différentes parties qui le constitue, qui le forme et qui le déforme.

alimentaire... Voilà ce qu'on appelle le tragique : l'opposition de deux forces qui ne sont pas d'accord et qui, pourtant, ont raison toutes deux. Face au tragique des situations, la tentation est de préférer le drame avec son schéma élémentaire : le bon et le méchant, et de proposer une solution unique quitte à détruire l'autre, son raisonnement, son travail, son écologie intérieure, sa raison d'être. Face à la tentation facile qui est celle de la dramatisation et de l'hystérie autour des questions agricoles, nous faisons ici le pari « d'appivoiser le tragique », de concilier écologie et économie, théorie et pratique, fertilité et rendement, productivité et santé des sols, nourriture abondante et santé humaine...

Dans le contexte actuel, le bon sens paysan qui est l'actif le plus solide des agriculteurs, est parfois mis à mal. Plus que jamais la tentation est grande de piloter les terres par l'excès. L'agriculture dite conventionnelle a pris un virage dont nous mesurons aujourd'hui justement les effets négatifs. Une correction de trajectoire est rendue nécessaire mais à bien y réfléchir et si nous n'y prenons pas garde, d'autres sorties de route se préparent. Entre deux excès contraires se trouve souvent une voie médiane appelée « médiété », concept aristotélicien. Ce juste milieu est selon Aristote là où se trouve toute vertu. Ainsi la générosité se place entre l'avarice et la prodigalité. Le courage est la médiane entre la peur et la témérité. La grande ambition de ce livre est de tenter de proposer aux agriculteurs quels que soient leurs productions, leurs systèmes de culture ou leurs cahiers des charges, cette voie médiane et vertueuse qui nous est masquée par les grandes théories dramatisantes de notre début de siècle et du siècle dernier. Pour cela il vous invite dans les premières parties à réappivoiser le « tragique » en décortiquant les excès, les outrances et les limites de l'agriculture conventionnelle et les promesses exagérées et les succès en trompe-l'œil des différentes formes d'agriculture dites durables. Ensuite il propose – en redonnant sa juste place à l'homme dans l'écosystème cultivé, un nouveau paradigme d'agriculture bio-inspiré, à l'écoute des faits et à l'écoute des mécanismes et des relations complexes du vivant. Enfin les dernières parties de ce livre donnent une méthode basée sur la connaissance fine des sols pour restaurer les grands équilibres minéraux, physiques et biologiques. Remettre le sol au centre du dispositif relève ainsi d'une véritable révolution mentale qu'il est souhaitable aujourd'hui de mettre en place. C'est pourquoi nous invitons le lecteur à ne pas faire l'économie de la lecture des premières parties qui pourraient lui sembler par trop théoriques. Sans quoi la mise en pratique que nous proposons pourrait sembler infondée. Or toute la pratique qui est ici exposée est profondément ancrée dans une science souvent malmenée, détournée et mal comprise. Cette science s'appelle l'écologie.

Avec ce livre, l'auteur offre aux agriculteurs, et aux agronomes un condensé de son cheminement intellectuel et de son approche. Sa volonté, au travers de cet ouvrage, est d'élargir le « champ des possibles » « à tous ceux qui voudront bien partager ses réflexions et imaginer des prolongements ».

# INTRODUCTION DES ÉPIS DE BLÉ EN OR

---

*Avril : 22 jours de pluie, 99,6 mm de cumul de précipitations.*

*Mai : 24 jours de pluie et 195 mm.*

*Juin : 16 jours de pluie et 120,5 mm.*

*Extrait personnel de journal de culture, Nièvre, 1994*

L'année 1994 fait partie de ces années que l'on a envie d'oublier dans une vie d'agriculteur, de celles qui valident ce vieux dicton : « année de foin, année de rien ». Cette pluviométrie excessive – certes favorable à la croissance de l'herbe – fut en effet complètement désastreuse pour le remplissage des grains de blé.

Un automne et un hiver 1993-1994 plutôt cléments avaient pourtant produit en sortie d'hiver des blés, des orges « en herbe » luxuriants, épais et drus. Avec le climat de fin de printemps, les récoltes prometteuses prirent cependant de jour en jour une teinte de moins en moins chatoyante, puis virèrent aux jaunes sales ; des reflets grisâtres, puis rouille apparaissant au fil du temps. En juin, les espoirs finirent par définitivement s'évanouir avec les pluies ininterrompues. En juillet le couperet tombe sous la barre de la moissonneuse-batteuse. Les résultats concrétisent les craintes. Hectare après hectare, la catastrophe se confirme. Le nombre de grains est là, mais ils sont maigres, le PS (poids spécifique) et le PMG (poids de mille grains) sont misérables. Les grains sont creux et fripés, le rendement plafonnera à 45 quintaux par hectare (q/ha). Pas de quoi payer les charges proportionnelles et fixes. Tournons vite la page ! Après tout c'est le lot de l'agriculteur de s'inscrire dans le temps, de voyager entre l'espoir d'une récolte abondante et la déception ou la surprise heureuse et de réécrire une page nouvelle chaque automne, chaque printemps, avec le même enthousiasme. Évidemment puisqu'à chaque fois on donne le meilleur de ce que l'on sait, encore enrichi des expériences passées.

Pourtant, en dépit de la déception, cette année 1994 allait se révéler riche en enseignement. Avec le recul, on peut affirmer qu'elle valait son pesant d'or et que les mauvaises récoltes étaient sans doute le prix à payer pour apprendre. Parfois seules les situations extrêmes permettent d'offrir des contrastes suffisants pour donner à voir ce que d'ordinaire la nuance ne laisse pas apparaître. C'est ainsi qu'au détour d'une fourrière en courbe, éclairée par les phares de la batteuse, dans la mer d'épis grisâtres, une tache couleur or se détachait de plus en plus nettement dans le champ. Sur place le constat est plus surprenant encore. Des épis d'une belle couleur jaune font parfaitement le crochet du haut de leur chaume ! Dehors, l'élévateur à godets de la machine crache un flot ininterrompu de blé rebondi, visiblement lourd, d'une belle couleur de croûte de pain. Immédiatement, la

décision est prise de contourner cet endroit et d'y revenir vite le lendemain matin pour constater cela de plein jour.

À la lumière du soleil, à pied, les yeux au niveau du blé, à l'air frais du petit matin, il s'avère qu'il y a plusieurs endroits en lisière du champ où le phénomène observé la veille s'exprime. À un endroit, la chose est encore plus étonnante. Une branche maîtresse d'un arbre de bordure, brisée dans l'hiver par les vents violents et restée sur place, avait nécessité de contourner avec le pulvérisateur au printemps. Cette partie de la culture n'avait donc pas pu recevoir de fongicide. Le blé y était pourtant bien plus sain que partout ailleurs et le rendement devait être au moins 50 % supérieur. À y regarder de plus près, ce phénomène était très marqué près des grands arbres et notamment à proximité des chênes, mais aussi de quelques autres espèces dont les noyers et les merisiers sauvages. Qu'avait-il donc bien pu se produire cette année-là ?

La pluviométrie exceptionnellement abondante avait réduit l'impact de la compétition pour l'eau entre les arbres et la graminée. L'eau n'était, cette année-là, plus un facteur limitant. Seuls les effets positifs de cette cohabitation subsistaient. Il devenait probable que plusieurs mécanismes collaboratifs, régulateurs, écosystémiques, symbiotiques, adaptatifs de la Nature dont on a connaissance par la lecture de publications scientifiques s'étaient pleinement exprimés cette année-là en lisière des bois. La virtualité devenait réalité. À la lueur de cette expérience et d'autres, subies ou provoquées par l'expérimentation sur l'exploitation, l'idée devait s'imposer alors de plus en plus : qu'un blé malade, ne l'est pas forcément du fait d'une « carence en fongicide », ni d'une fatalité. C'est le plus souvent un blé qui n'a pas bénéficié de la solidarité du sol et de son environnement microbiologique.

## Des solidarités dans les sols

Les phénomènes à l'origine de ces observations sont de toute évidence aussi bien souterrains qu'aériens. Les mécanismes de transfert de nutriments sont désormais bien connus. Les endomycorhizes peuvent s'établir pour des plantes d'espèces différentes. Il est donc possible que des transferts entre plantes de même espèce, mais aussi entre plantes d'espèces différentes s'effectuent de manière très efficace (travaux de Suzanne Simard, Université de Colombie-Britannique). Lors de ce printemps humide et peu lumineux de 1994, la photosynthèse défaillante des blés a très certainement été compensée par celle demeurée efficace des grands arbres, ce mécanisme de compensation se faisant par le système efficace d'échange et transfert d'hydrates de carbone (*i.e.* glucides) dans le sol. Il est démontré que des transferts de ce type s'effectuent entre de nombreuses plantes comme par exemple entre le plantain lancéolé et la fétuque ovine (Francis & Read, 1984). Ce mécanisme est d'autant plus marqué que l'une des plantes souffre d'un manque de lumière qui pénalise la production de sucre par photosynthèse. Le phénomène peut être multiplié par six en cas d'ombrage total comme dans le cœur d'une forêt. C'est ce qui explique la survie de jeunes plantes dans les forêts à l'obscurité quasi-totale causée par les arbres adultes. Les générations de plantes âgées fournissent de façon collaborative des nutriments aux plus jeunes et ce faisant elles assurent la survie et la croissance des générations



suivantes. Ceci quand bien même elles ne sont pas de la même espèce. Ainsi elles bénéficient en retour des services « barrières », « tampons » ou « collaboratifs » rendus possibles par le maintien d'un écosystème riche et équilibré.

## Un Internet de la nature

On sait très bien aujourd'hui qu'il existe des mécanismes de répartition des richesses entre les plantes et que ces mécanismes sont favorisés par la vie du sol. De tels mécanismes ont notamment été mis en évidence par la chercheuse Suzanne W. Simard. En utilisant des formes isotopiques de phosphore dont elle a recouvert une parcelle de 1 m<sup>2</sup> de surface forestière, elle a démontré que les éléments avaient circulé sur une surface de 1 000 m<sup>2</sup> au bout de trente jours. Les mécanismes de capillarité ne suffisent pas à eux seuls à expliquer cette extraordinaire mobilité d'un élément justement d'ordinaire très peu mobile dans le sol. Il apparaît que seuls les grands arbres, sans doute supportés en cela par les mycorhizes, ont été capables de s'échanger ce minéral et de le faire circuler dans l'écosystème. Ceci a une incidence sur les sols : un sol qui fonctionne bien est aussi un sol où il y a peu d'hétérogénéité. Des isotopes du carbone ont servi à démontrer que deux espèces des forêts canadiennes, le sapin de Douglas et le bouleau, échangent des molécules par leurs racines. Les arbres d'une forêt sont des êtres sociaux et la communication entre eux leur est bénéfique. Et les plantes échangent bien plus que des nutriments. Elles sont capables d'échanger des informations. Une plante attaquée par un ravageur ou atteinte par une maladie peut dégager dans son environnement racinaire des signaux qui seront interprétés par d'autres. Il est montré que ces plantes saines dans certains cas réagissent à ces signaux en adaptant leur métabolisme comme pour se préparer au péril qui les guette. Le chercheur Song Yuan (2015), du Laboratoire d'agriculture écologique de Guangzhou a en 2010 planté des tomates deux par deux, puis soumit les feuilles d'une partenaire de chaque couple à l'attaque d'un ravageur. En présence du champignon racinaire, la tomate saine se met à produire des enzymes de défense, habituellement synthétisées lors de l'agression. À l'inverse, si la mycorhize est absente, les défenses de la tomate saine ne sont pas mobilisées.

Le canal de transmission à la fois des nutriments et des informations serait assuré efficacement par les réseaux mycorhiziens. D'innombrables espèces sont complètement interconnectées les unes aux autres par des liens autres que les chaînes trophiques (l'alimentation). Certaines de ces espèces ne peuvent en réalité pas vivre sans les échanges qu'elles entretiennent avec des autres. Ainsi certaines souches de micro-organismes ne peuvent pas être multipliées en cultures isolées.

## Les échanges sont souverains également dans les systèmes cultivés

Dans le cas de notre champ de blé de 1994, les « panneaux photovoltaïques » des arbres ont visiblement joué la solidarité avec la culture. L'hypothèse est que le fonds de péréquation, l'économie solidaire mise en action a permis à des plantes pérennes,