

# Table des matières

<b>Préface</b> . . . . .	13
André MARIOTTI	
<b>Chapitre 1. Caractérisation de l'état des sols</b> . . . . .	17
Christian VALENTIN	
1.1. Les sols au cœur de la zone critique . . . . .	17
1.1.1. Définitions. . . . .	17
1.1.2. Fonctions et services des sols . . . . .	17
1.1.3. Dégradation des sols, des terres, désertification . . . . .	19
1.2. La difficile évaluation de l'état et des cinétiques de dégradation ou d'amélioration des sols . . . . .	19
1.2.1. Évaluation mondiale . . . . .	20
1.2.1.1. À dire d'experts . . . . .	20
1.2.1.2. Par télédétection spatiale . . . . .	21
1.2.1.3. Par modélisation . . . . .	21
1.2.1.4. Des incertitudes encore trop grandes . . . . .	21
1.2.2. Formes de dégradation . . . . .	21
1.2.3. Principaux facteurs de la dégradation des sols . . . . .	24
1.2.4. Quelle tendance : spirale de dégradation ou courbe en U ? . . . . .	25
1.2.5. La nécessité de dispositifs de suivi . . . . .	28
1.3. Conservation, restauration, réhabilitation et compensation . . . . .	28
1.3.1. Définitions. . . . .	28
1.3.2. Mise en œuvre . . . . .	29
1.3.3. Concept de neutralité en termes de dégradation des terres . . . . .	30
1.4. Conclusions . . . . .	31
1.5. Bibliographie . . . . .	32

## **Chapitre 2. L'encroûtement superficiel des sols et la récolte du ruissellement . . . . . 37**

Christian VALENTIN

2.1. États de surface et croûtes superficielles . . . . .	37
2.2. Types de croûtes et processus de formation . . . . .	38
2.2.1. Croûtes structurales . . . . .	38
2.2.2. Croûtes grossières . . . . .	39
2.2.3. Croûtes d'érosion. . . . .	40
2.2.4. Croûtes de dépôt . . . . .	40
2.2.5. Croûtes et efflorescences salines . . . . .	41
2.2.6. Croûtes biologiques . . . . .	41
2.3. Facteurs d'encroûtement et principes d'amélioration de la stabilité structurale. . . . .	42
2.3.1. Les sols. . . . .	42
2.3.2. La pluie . . . . .	43
2.3.3. La pente . . . . .	43
2.3.4. Le couvert . . . . .	43
2.3.5. Pratiques agricoles . . . . .	43
2.4. Conséquences de l'encroûtement superficiel. . . . .	44
2.4.1. Hydrologiques : l'écoulement hortonien . . . . .	44
2.4.2. Écologiques : exemple de la brousse tigrée . . . . .	46
2.4.3. Agronomiques : la récolte du ruissellement . . . . .	47
2.5. Conclusions . . . . .	48
2.6. Bibliographie . . . . .	49

## **Chapitre 3. Érosion et principes de conservation des sols . . . . . 53**

Christian VALENTIN et Jean Louis RAJOT

3.1. Définitions . . . . .	53
3.2. Importance de l'érosion . . . . .	54
3.2.1. À l'échelle mondiale. . . . .	54
3.2.2. Effets de l'érosion . . . . .	55
3.3. Processus et facteurs . . . . .	59
3.3.1. Le détachement par rejaillissement . . . . .	59
3.3.2. L'érosion en nappe. . . . .	61
3.3.3. L'érosion concentrée (= érosion linéaire) . . . . .	65
3.3.3.1. En surface : érosion en rigoles et ravines . . . . .	65
3.3.3.2. Dans le sol : suffusion (ou suffosion, ou érosion en tunnel) . . . . .	67
3.3.4. Mouvements de masse. . . . .	67
3.3.5. L'érosion aratoire . . . . .	69

3.3.6. L'érosion éolienne . . . . .	70
3.4. L'érosion : une question d'échelle . . . . .	73
3.4.1. Échelles d'espace. . . . .	73
3.4.2. Échelles de temps . . . . .	74
3.4.2.1. Durée de mesures . . . . .	74
3.4.2.2. Érosion cumulée – les marqueurs isotopiques . . . . .	75
3.4.3. Échelles d'espace. . . . .	75
3.4.3.1. Origine des sédiments – les signatures de natures diverses. . . . .	75
3.4.3.2. Les distances de transfert et les temps de résidence . . . . .	76
3.4.4. Transports particuliers et dissous. . . . .	76
3.4.5. Les poussières éoliennes . . . . .	77
3.5. Modélisation . . . . .	78
3.5.1. Approches statistiques . . . . .	78
3.5.2. Modèles à bases physiques . . . . .	79
3.5.3. Modèles hybrides. . . . .	80
3.6. Principes de conservation des sols . . . . .	80
3.6.1. À l'échelle du champ : limiter le détachement . . . . .	80
3.6.1.1. Accroître la stabilité structurale : amender le sol. . . . .	80
3.6.1.2. Réduire l'énergie cinétique reçue : maintenir un couvert en surface . . . . .	80
3.6.1.3. Réduire la vitesse de ruissellement : diminuer la pente et la longueur des parcelles . . . . .	81
3.6.1.4. Réduire la vitesse du vent : accroître la rugosité superficielle . . . . .	82
3.6.1.5. Éviter l'émiettement du sol : réduire le travail du sol et le piétinement par le bétail . . . . .	82
3.6.2. À l'échelle des bassins versants : ralentir le ruissellement et favoriser les dépôts . . . . .	83
3.7. Densité de population, contextes économiques et politiques publiques. . . . .	84
3.8. Conclusions . . . . .	86
3.9. Bibliographie . . . . .	87

## **Chapitre 4. Acidité et acidification des sols . . . . . 97**

Étienne DAMBRINE

4.1. Acidité . . . . .	97
4.2. Définitions de l'acidification et son évolution . . . . .	99
4.3. Illustration : évolution théorique à long terme de l'acidité d'un loess calcaire . . . . .	101

4.4. Processus acidifiants . . . . .	102
4.5. Participation de grands cycles biogéochimiques à l'acidification des sols . . . . .	103
4.5.1. Cycle de l'azote . . . . .	103
4.5.2. Cycle du carbone . . . . .	103
4.5.3. Absorption de cations/anions par les végétaux . . . . .	103
4.5.4. Dépôts acides ou alcalins . . . . .	104
4.5.5. Autres cycles P, S, Fe, Mn . . . . .	104
4.6. Neutralisation de l'acidification . . . . .	104
4.7. Biogéographie de l'acidité . . . . .	105
4.8. Conséquences physiques et biologiques de l'acidité des sols . . . . .	106
4.9 Bibliographie . . . . .	107

## **Chapitre 5. Salinisation des sols et gestion des sols salés . . . . . 111**

Jean-Pierre MONTOROI

5.1. Introduction . . . . .	111
5.2. Les milieux salés naturels . . . . .	111
5.2.1. Les sels, entités dissoutes et particulières . . . . .	111
5.2.2. Des paysages typiques . . . . .	112
5.2.3. Des mouvements continuels de sels . . . . .	113
5.2.4. Services écosystémiques . . . . .	114
5.3. Caractérisation et fonctionnement des sols salés . . . . .	115
5.3.1. Diagnostic du degré de salinisation . . . . .	115
5.3.2. Processus physico-chimiques intrinsèques . . . . .	116
5.3.2.1. Salinisation <i>stricto sensu</i> . . . . .	116
5.3.2.2. Salinisation et sulfato-réduction . . . . .	117
5.3.2.3. Sodisation . . . . .	117
5.3.2.4. Alcalisation . . . . .	117
5.3.3. Concentration et voies d'évolution chimique de l'eau du sol . . . . .	119
5.3.3.1. Alcalinité résiduelle . . . . .	119
5.3.3.2. Spéciation ionique, adsorption ionique et modèles géochimiques . . . . .	120
5.3.4. Minéralogie des efflorescences salines . . . . .	121
5.4. Typologie des sols salés . . . . .	122
5.4.1. Caractéristiques pédologiques . . . . .	122
5.4.2. Distribution verticale de la salinité . . . . .	123
5.4.3. Distribution spatiale de la salinité . . . . .	124
5.4.4. Classification des sols salés . . . . .	124
5.4.5. Répartition mondiale des sols salés . . . . .	126
5.5. Salinisation secondaire des sols . . . . .	126

5.5.1. Apports anthropiques de sels dans les sols . . . . .	126
5.5.2. Salinisation des systèmes irrigués . . . . .	127
5.5.3. Contrôle des sels en irrigation . . . . .	128
5.5.4. Utilisation des eaux non conventionnelles . . . . .	129
5.6. Mise en valeur agricole des sols salés . . . . .	130
5.6.1. Contexte historique . . . . .	130
5.6.2. Effets de l'eau salée du sol pour les plantes . . . . .	130
5.6.3. Solutions agronomiques . . . . .	131
5.6.4. Solutions macro-économiques . . . . .	133
5.6.5. Solutions sociales et politiques . . . . .	134
5.7. Conclusions . . . . .	134
5.8. Bibliographie . . . . .	135

## **Chapitre 6. Pollutions métalliques . . . . . 141**

Denis BAIZE

6.1. Généralités . . . . .	141
6.1.1. Définitions – les éléments en traces . . . . .	141
6.1.1.1. Le fond pédogéochimique naturel (FPGN) . . . . .	142
6.1.1.2. Les teneurs agricoles habituelles (TAH). . . . .	142
6.1.1.3. TAH et FPGN : quel territoire ? . . . . .	142
6.1.1.4. Intérêt de déterminer les FPGN et les TAH par « séries de sols » . . . . .	142
6.1.1.5. Origine des métaux dans les sols . . . . .	143
6.1.2. Risques et dangers – voies d'exposition et de transfert . . . . .	143
6.1.2.1. Définitions . . . . .	143
6.1.2.2. Les différents dangers – voies d'exposition et de transfert . . . . .	144
6.1.2.3. Contamination <i>versus</i> pollution . . . . .	144
6.1.2.4. Distinguer les ETM « naturels » (géogènes, pédogènes) et « anthropiques » . . . . .	145
6.1.2.5. Importance des formes chimiques des éléments . . . . .	145
6.1.3. Différentes formes et localisation des éléments en traces dans les sols . . . . .	146
6.1.4. Méthodes de mesures et d'estimation disponibles . . . . .	147
6.1.4.1. Les teneurs « totales » et « pseudo-totales » . . . . .	147
6.1.4.2. Les extractions partielles . . . . .	148
6.1.4.3. Les extractions séquentielles . . . . .	149
6.1.5. Comment évaluer le niveau de pollution d'un sol ? . . . . .	149
6.1.5.1. Les trois approches simples . . . . .	150
6.1.5.2. L'exemple du plomb à Bazeville (Beauce) . . . . .	153
6.1.5.3. Calcul des facteurs d'enrichissement . . . . .	155

6.2. Sites pollués célèbres (France) . . . . .	155
6.2.1. Metaleurop à Noyelles-Godault . . . . .	156
6.2.2. Mortagne-du-Nord . . . . .	158
6.2.3. Plaine de Pierrelaye (pollution polymétallique) . . . . .	159
6.2.3.1. Historique des épandages . . . . .	159
6.2.3.2. La contamination des sols . . . . .	160
6.3. Sites pollués locaux et contaminations diffuses . . . . .	161
6.3.1. Site de traitement de poteaux pollué par du cuivre en contexte de podzosal. . . . .	161
6.3.2. Contaminations des sols par des boues de stations d'épuration . . . . .	161
6.3.2.1. Épandages de boues d'épuration très chargées en ETM sur les sols du Vexin . . . . .	162
6.3.2.2. L'essai de Bézu-le-Guéry . . . . .	163
6.3.2.3. L'expérimentation du domaine de Couhins (INRA, Bordeaux) . . . . .	164
6.3.2.4. La situation actuelle . . . . .	165
6.3.3. Contaminations par le cuivre dans les sols de vignobles . . . . .	167
6.3.4. Contaminations des sols par le cuivre et le zinc suite aux épandages répétés de lisiers de porcs . . . . .	168
6.3.5. Les retombées atmosphériques de plomb depuis l'Antiquité . . . . .	170
6.3.6. Les nanoparticules métalliques (NPM) . . . . .	171
6.4. Impacts des pollutions métalliques. . . . .	172
6.4.1. Bio- et phytodisponibilité – voies d'absorption . . . . .	172
6.4.2. La mobilité . . . . .	172
6.4.3. Estimation de la mobilité et de la biodisponibilité . . . . .	173
6.4.4. Importance des propriétés du sol vis-à-vis de la spéciation, de la biodisponibilité et de la mobilité . . . . .	173
6.5. Que faire face à des sols pollués par des métaux ? . . . . .	174
6.5.1. Stratégies sans traitements . . . . .	175
6.5.2. Décapage des horizons pollués. . . . .	175
6.5.3. Immobilisation <i>in situ</i> et phytoremédiation . . . . .	175
6.5.3.1. Immobilisation <i>in situ</i> . . . . .	175
6.5.3.2. Les méthodes de phytoremédiation. . . . .	176
6.5.4. Un exemple : le site de Maatheide-Lommel (Belgique) . . . . .	177
6.5.4.1. État initial . . . . .	177
6.5.4.2. Premiers traitements. . . . .	179
6.6. Bibliographie . . . . .	180

**Chapitre 7. Pollutions organiques et réhabilitation des sols . . . . . 183**

Corinne LEYVAL, Aurélie CÉBRON et Pierre FAURE

7.1. La pollution organique : ses origines et sa diversité . . . . .	183
7.2. Origine et répartition des HAP dans les sols . . . . .	184
7.3. Caractéristiques, propriétés et toxicité des HAP . . . . .	185
7.4. Devenir et impact des pollutions organiques dans les sols : des outils et des approches . . . . .	187
7.4.1. Sorption des HAP dans les sols . . . . .	188
7.4.2. Biodisponibilité et vieillissement de la contamination en HAP dans les sols . . . . .	189
7.4.3. Biodégradation et microorganismes impliqués . . . . .	190
7.5. Devenir des HAP dans la rhizosphère des plantes . . . . .	191
7.6. Quelles techniques de remédiation, limites et contraintes ? . . . . .	193
7.7. De la remédiation à la restauration . . . . .	195
7.8. Conclusions . . . . .	196
7.9. Bibliographie . . . . .	197

**Chapitre 8. Les sols urbains : artificialisation et gestion . . . . . 203**

Laure VIDAL-BEAUDET et Jean-Pierre ROSSIGNOL

8.1. Introduction . . . . .	203
8.2. Urbanisation des sols . . . . .	204
8.2.1. Histoire et origine des sols urbains . . . . .	204
8.2.2. Artificialisation et imperméabilisation . . . . .	206
8.3. Caractéristiques des sols en milieu urbain . . . . .	207
8.3.1. Typologie des sols urbains . . . . .	208
8.3.1.1. Les sols artificialisés . . . . .	208
8.3.1.2. Les sols végétalisés . . . . .	210
8.3.2. Les propriétés des sols urbains artificialisés . . . . .	210
8.4. Classification et cartographie des sols urbains . . . . .	211
8.4.1. Classification . . . . .	211
8.4.2. Cartographie . . . . .	213
8.5. Des sols fertiles pour des espaces végétalisés . . . . .	216
8.5.1. Les sols reconstitués . . . . .	216
8.5.2. Cas particulier du mélange terre-pierres . . . . .	218
8.5.3. Les sols construits à partir de « déchets » des villes . . . . .	219
8.6. Conclusions . . . . .	220
8.6.1. « La trame brune » . . . . .	220
8.6.2. Valeur et protection des sols urbains . . . . .	220
8.7. Bibliographie . . . . .	222

<b>Chapitre 9. Le recyclage des produits résiduaire organiques en contexte tropical</b> . . . . .	<b>225</b>
Frédéric FEDER	
9.1. Définition, typologie et principales caractéristiques des produits résiduaire organiques . . . . .	225
9.1.1. Définition des produits résiduaire organiques et des enjeux associés . . . . .	225
9.1.2. Typologie des produits résiduaire organiques . . . . .	226
9.1.2.1. Origines des produits résiduaire organiques . . . . .	226
9.1.2.2. Les principale traitement des produits résiduaire organiques . . . . .	227
9.2. Caractérisation analytique des produits résiduaire organiques . . . . .	229
9.2.1. Les élément chimique d'intérêt agronomique (C, N, P, K) . . . . .	229
9.2.2. Analyse spécifique des propriétés organiques . . . . .	230
9.2.3. Les contaminant trace organiques et métalliques . . . . .	231
9.3. Intérêt agronomique et risque environnemental . . . . .	232
9.3.1. Aspect fertilisant des produits résiduaire organiques . . . . .	232
9.3.2. Aspect amendant des produits résiduaire organiques . . . . .	233
9.3.2.1. Augmentation des teneur en matière organique des sols . . . . .	233
9.3.2.2. Amélioration des propriétés physique, chimique et microbiologique . . . . .	234
9.3.3. Les contaminant métallique, organique et biologique . . . . .	236
9.3.3.1. Les contaminant trace métallique et organique . . . . .	236
9.3.3.2. Les contaminant biologique . . . . .	237
9.3.3.3. Impact des procédé de transformation des produits résiduaire organique . . . . .	237
9.3.4. Autre impact environnemental . . . . .	238
9.3.4.1. Les pertes d'azote par volatilisation et par lixiviation . . . . .	238
9.3.4.2. Les émission de protoxyde d'azote, de méthane et de dioxyde de carbone . . . . .	238
9.4. Exemple de recyclage de produit résiduaire organique en contexte tropical . . . . .	239
9.4.1. En système faiblement intensifié . . . . .	239
9.4.2. En système intensifié . . . . .	240
9.5. Bibliographie . . . . .	243
 <b>Liste des auteurs</b> . . . . .	 <b>247</b>
 <b>Index</b> . . . . .	 <b>249</b>
 <b>Sommaire des autre volume de la série</b> . . . . .	 <b>261</b>