



**HAL**  
open science

## Chapitre 6. Pollutions métalliques.

Denis Baize

► **To cite this version:**

Denis Baize. Chapitre 6. Pollutions métalliques.. Les sols au coeur de la zone critique 5 : Dégradation et réhabilitation, 5, ISTE Editions, 260 p., 2018, Collection Géosciences - Série Les Sols, 9781784053833 9781784063832. hal-02788957

**HAL Id: hal-02788957**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02788957>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# 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 organique et métallique . . . . .	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>