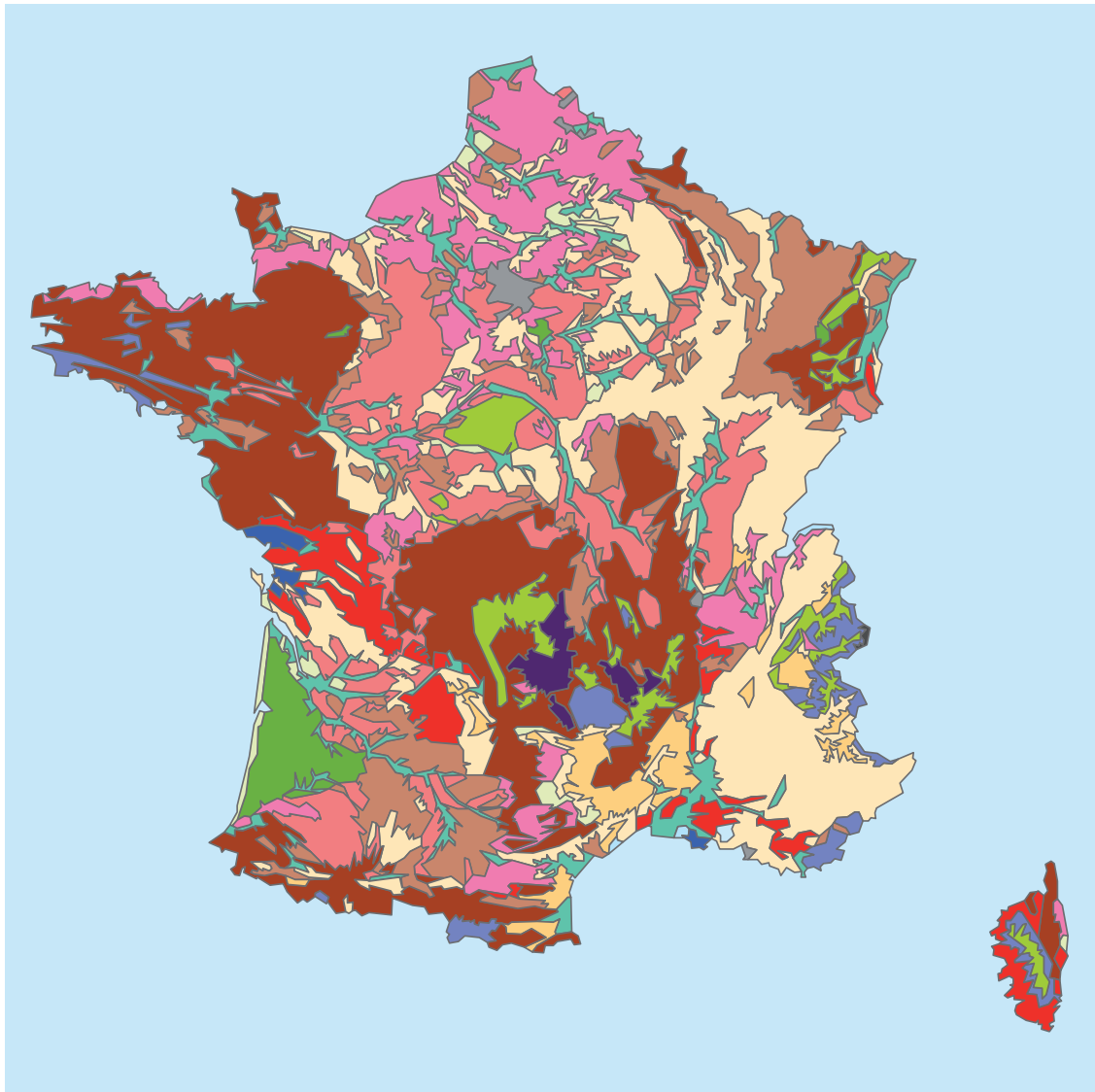


Synthèses

# Grands paysages pédologiques de France

Marcel Jamagne



éditions  
Quæ

# Préface

---

Les sols que nous observons dans les paysages ne sont pas distribués au hasard. Leur organisation spatiale dépend des grands facteurs de la pédogenèse : nature des matériaux parentaux, géomorphogenèse et position topographique, climats passés et présents et végétations associées, actions de l'homme tout au long de l'histoire. L'ensemble de ces facteurs génère des systèmes organisés dans l'espace.

Ces systèmes sont la clé de compréhension de la variabilité spatiale de la couverture pédologique et le siège de fonctionnements et de processus qui régissent les flux d'eau et de matière. Ils constituent des ensembles caractérisés par des échanges, des interactions et des évolutions, à des échelles de temps allant de celle d'une pluie jusqu'à celle de l'histoire géologique et pédologique ayant conduit à la géomorphologie et à la différenciation des sols que nous observons aujourd'hui.

Décrire l'organisation des sols dans un paysage, c'est donc à la fois comprendre la genèse de ces systèmes organisés et en donner les clés du fonctionnement actuel.

C'est cet exercice difficile que nous propose Marcel Jamagne dans cet ouvrage. En choisissant de nous présenter une sélection des grands paysages pédologiques français, il nous livre une vision spatialisée des processus fondamentaux qui régissent l'évolution et le fonctionnement des sols. Cet ouvrage offre donc une vision synthétique de la diversité des « systèmes-sols » de France.

Le pari de cette synthèse aurait pu paraître risqué. Décrire en quelques pages un paysage ayant fait l'objet de milliers de sondages et de profils pédologiques, de nombreuses thèses, et de cartes pédologiques accompagnées de notices détaillées, est un exercice qui demande un effort de synthèse et un recul hors du commun.

C'est grâce à l'expérience acquise pendant plus de trente ans à la direction du Service d'Étude des Sols et de la Carte Pédologique de France, qu'il lança en 1968, que Marcel Jamagne a pu gagner ce pari. Celui que l'on peut aujourd'hui considérer comme le fondateur, le « père », de la cartographie des sols et de son harmonisation en France était sans aucun doute le seul à pouvoir le faire. Véritable visionnaire, il anticipait déjà en 1967, dans son ouvrage *Bases et techniques d'une cartographie des sols* l'arrivée des systèmes d'information géographique en écrivant à propos des utilisations thématiques de la cartographie des sols : « la carte des sols [...] est le fond sur lequel on peut dessiner toutes les autres cartes ». Auteur de la célèbre chronoséquence d'évolution des sols limoneux issus des loess du nord de la France, il fut l'un des premiers à combiner une vision spatiale et temporelle de la distribution des sols et de leur pédogenèse dans un grand paysage français.

Marcel Jamagne créa un réseau de collaborateurs et coordonna la réalisation de la *Carte pédologique de France* pendant trente ans. Il a pu ainsi appréhender sur le terrain toute la diversité et toute la complexité des paysages pédologiques du territoire français. Il parvient, dans cet ouvrage, à nous en restituer les clés de compréhension grâce à une présentation synthétique, dans un langage accessible accompagné d'illustrations précises et pédagogiques.

À l'heure où les sols sont enfin considérés comme un patrimoine naturel essentiel, à protéger au même titre que l'eau ou l'air, cet ouvrage est le bienvenu. On peut en imaginer trois modes de lecture : un livre qu'on lira d'un trait, comme un roman, et dont on sortira avec un panorama de la diversité et de l'origine des systèmes-sols de France, véritable kaléidoscope de nos paysages pédologiques ; un manuel du naturaliste ou du promeneur, qui de région en région, disposera des clés de compréhension des paysages et des sols qui l'entourent ; ou un ouvrage didactique et formateur sur l'origine et le fonctionnement de ces systèmes, qui décrit de façon claire les grandes caractéristiques de la pédogenèse et de la morphogenèse en milieu tempéré.

La dernière partie livre une synthèse remarquable de l'évolution pédogénétique, de la répartition, des propriétés et du fonctionnement des principaux sols des grands domaines physiographiques et pédologiques du territoire français. Ces ensembles sont replacés dans le contexte européen et mondial. Une corrélation entre la taxonomie utilisée et le référentiel international WRB est proposée.

Cette publication constituera sans aucun doute une référence incontournable pour tous ceux qui s'intéressent aux sols, comme pour tous ceux qui désirent mieux comprendre l'organisation et le fonctionnement des paysages, des écosystèmes et des agro-systèmes de France. Elle est l'aboutissement d'une somme considérable de connaissances accumulées depuis plusieurs décennies et rendues accessibles à des publics variés.

Marcel Jamagne a fait preuve d'un constant dynamisme durant ces trente années de coordination de la cartographie des sols de France. Passionné d'enseignement, il nous offre cet ouvrage à la fois complet et pédagogique. Grâce à lui, nous disposons enfin aujourd'hui de la première synthèse nationale sur la diversité des paysages pédologiques de France. Face à des enjeux environnementaux de plus en plus exacerbés, ce document servira à l'évidence de référence pour les années à venir en apportant notamment des fondements indispensables pour une gestion durable et spatialisée des ressources en sols.

**Dominique Arrouays, Directeur de l'unité Infosol  
et Dominique King, Président du centre Inra d'Orléans**

# Table des matières

---

<b>Préface</b> .....	VII
<b>Avant-propos</b> .....	XXI

## PARTIE 1. OBSERVATION ET ANALYSE DES COUVERTURES PÉDOLOGIQUES

<b>Chapitre 1. Introduction</b> .....	3
La couverture pédologique .....	3
Typologies et analyse spatiale .....	4
Cartographie et classification .....	5
<b>Chapitre 2. Rappel de quelques notions de base</b> .....	7
Organisation et caractérisation des sols .....	7
Les constituants .....	7
Les différents niveaux d'organisation .....	8
Le profil pédologique – Le solum .....	9
Le profil culturel .....	11
Observation et description des sols .....	12
Couleur .....	12
Composition minérale .....	12
Composition organique et activités biologiques .....	13
Structure .....	13
Caractéristiques particulières – Traits pédologiques .....	14
Qualité des limites entre horizons .....	14
Échantillonnage et caractérisation analytique .....	14
Échantillonnage général du profil .....	15
Échantillonnages particuliers .....	15
Compartimentation de la couverture pédologique .....	15
Les Unités Typologiques de Sols (UTS) .....	16
Les Unités Cartographiques de Sols (UCS) .....	16
Les Unités de Fonctionnement des Sols (UFS) .....	18
Grands facteurs de la formation des sols .....	19

Matériaux originels .....	19
Géomorphologie – Relief .....	20
Climatologie .....	21
Régimes hydriques – Économie en eau .....	21
Végétation .....	22
Durée des phénomènes pédogénétiques – Facteur temps .....	23
<b>Chapitre 3. Principaux processus de la pédogenèse en France .....</b>	<b>25</b>
Différenciation verticale et latérale .....	25
Pédogenèses climatique et stationnelle .....	26
Processus dominants des milieux tempérés et humides .....	26
Altération et brunification .....	26
Redistribution de matière .....	27
Autres processus .....	29
Hydromorphie .....	30
Processus dominants des milieux méditerranéens et intertropicaux .....	30
Paléosols – Sols mono ou polyphasés .....	32
Séquences de sols et paysages pédologiques .....	36
Critères de différenciation des séquences .....	36
La notion d'évolution séquentielle .....	38
Les séquences chronologiques .....	38
Les séquences topographiques .....	38
Les systèmes-sols – Bases possibles d'une typologie .....	42
<b>Chapitre 4. Diversité des sols de France .....</b>	<b>43</b>
Grands types de sols de France .....	43
Sols des roches calcaires .....	43
Sols des matériaux sableux .....	44
Sols des matériaux argileux .....	44
Sols d'altération, peu différenciés, de matériaux variés .....	45
Sols des formations limoneuses .....	45
Autres types de sols .....	46
Cartographies et recherches associées .....	46
Systèmes-sols dans les paysages pédologiques .....	48
<b>Chapitre 5. Grands domaines pédologiques français .....</b>	<b>49</b>
Contexte géologique et lithologique .....	49
Les grands bassins sédimentaires .....	50
Les massifs anciens .....	51
Les chaînes ou massifs récents .....	51
Les plaines maritimes .....	52

Les pays méditerranéens .....	52
Facteurs dominants de la pédogenèse .....	52
Variabilité des matériaux originels .....	52
Contexte géomorphologique .....	53
Contexte climatique et paléoclimatique .....	53
Occupation végétale .....	54
Régimes hydriques .....	55
Influences anthropiques .....	55
Grands domaines pédologiques .....	57
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>59</b>
 PARTIE 2. LES SOLS DES BASSINS SÉDIMENTAIRES	
<b>Chapitre 6. Le bassin de Paris et ses marges .....</b>	<b>67</b>
Le bassin proprement dit .....	67
Cadre géographique .....	67
Géologie .....	68
Sols du bassin de Paris .....	73
Paysages pédologiques .....	96
Réflexions complémentaires sur les sols du bassin de Paris .....	108
La marge méridionale du bassin .....	109
Cadre géologique .....	109
Aperçu géomorphologique .....	111
Réseau hydrographique .....	111
Climat .....	111
Sols des formations détritiques .....	112
En conclusion .....	112
La Champagne crayeuse .....	113
Cadre géographique .....	114
Géologie et géomorphologie .....	114
Les sols de Champagne crayeuse .....	116
La Champagne humide .....	120
Cadre géographique .....	120
Géologie .....	120
Les sols de Champagne humide .....	121
La Bourgogne calcaire .....	125
Étapes de la morphogenèse en Bourgogne .....	125
Cadre géographique : Géologie – Hydrographie .....	126
Sols des plateaux calcaires jurassiques .....	127
Sols des formations de versants .....	129

Sols de la couverture résiduelle non calcaire des plateaux jurassiques	133
Sols des plateaux calcaires sud-bourguignons .....	134
Quelques conclusions sur la Bourgogne calcaire .....	137
Sols de l'Auxois et Terre Plaine .....	138
Sols de la Plaine de la Saône .....	142
La Lorraine sédimentaire – Plaines et Plateaux lorrains .....	145
Cadre géographique .....	145
Climat .....	146
Géologie et matériaux originels .....	148
Géomorphologie .....	152
Les sols de Lorraine .....	154
Quelques conclusions .....	163
<b>Chapitre 7. Le bassin d'Aquitaine</b> .....	167
Les Charentes .....	167
Cadre géographique .....	167
Géologie .....	168
Géomorphologie – Relief .....	170
Sols des Charentes .....	170
En conclusion .....	176
Les Landes .....	176
Cadre géographique .....	176
Géologie .....	179
Géomorphologie .....	180
Sols du Massif landais .....	183
Le Grand Sud-Ouest .....	187
Cadre géographique .....	187
La Gascogne .....	188
Géologie et matériaux originels de Gascogne .....	189
Géomorphologie et sols de Gascogne .....	191
Les sols de boubènes du Grand Sud-Ouest .....	195
Une chronoséquence des sols de boubènes .....	202
<b>Chapitre 8. Le Bassin rhodanien</b> .....	207
La moyenne vallée du Rhône .....	207
Cadre géographique .....	207
Géologie – Les ensembles lithologiques .....	208
Géomorphologie .....	209
Les régions naturelles .....	210
Les sols d'alluvions récentes .....	211
Les sols d'alluvions anciennes .....	213

Séquences d'évolution et principaux traits de la pédogenèse sur les terrasses anciennes .....	213
Les sols de formations loessiques .....	220
Les sols des formations calcaires et gréseuses .....	221
Quelques conclusions sur la moyenne vallée du Rhône .....	223
Le delta du Rhône et ses bordures .....	224
Cadre géographique .....	224
Édification du delta .....	225
La Camargue .....	227
Les sols de la plaine camarguaise .....	229
La rive droite du delta – Les Costières du Gard .....	232
La rive gauche du delta – Alpilles – Ouest Berre – Crau .....	234
Géologie .....	234
Les sols .....	235
<b>Chapitre 9. Le fossé rhénan .....</b>	<b>239</b>
Contexte géologique, historique et géographique du fossé rhénan .....	239
Les grands ensembles naturels .....	240
Le Sundgau .....	242
Cadre géographique .....	242
Géologie et matériaux parentaux .....	242
Les sols du Sundgau .....	243
« Avant Sundgau » et Ochsenfeld – Piémont Haut-Rhinois .....	246
Les piémonts et collines sous-vosgiennes .....	247
Données géologiques .....	247
Les sols des piémonts et collines .....	247
La plaine d'Alsace et le Ried nord .....	252
Sols de la partie méridionale de la plaine .....	254
Sols de la partie centrale de la plaine .....	255
Sols de la zone Ello-rhénane .....	256
Sols du Ried nord .....	258
Autres sols d'Alsace .....	258
Quelques conclusions sur l'ensemble du fossé rhénan .....	259
<b>Chapitre 10. Les plaines maritimes .....</b>	<b>261</b>
Le marais poitevin .....	261
Cadre géographique .....	261
Géologie – Géomorphologie .....	262
Régions naturelles .....	263
Les sols des marais .....	264
En conclusion .....	267



Les marais du Médoc .....	268
Cadre géographique .....	268
Géologie – Géomorphologie .....	268
Les sols des marais du Médoc .....	268
<b>Références bibliographiques</b> .....	271
 <b>PARTIE 3. LES SOLS DES MASSIFS ANCIENS</b>	
<b>Chapitre 11. Les Ardennes</b> .....	287
Cadre géographique .....	287
Géomorphologie – Relief .....	288
Climat .....	288
Géologie – Matériaux originels .....	288
Produits d'altération de roches paléozoïques .....	288
Formations limoneuses .....	289
Les sols des Ardennes .....	289
<b>Chapitre 12. Le Massif armoricain</b> .....	293
Cadre géographique .....	293
Géomorphologie – Les paysages .....	293
Régions naturelles .....	294
Le massif .....	294
Réseau hydrographique .....	294
Climat .....	295
Végétation – Occupation des sols .....	295
Géologie .....	296
Les sols du massif armoricain .....	300
Le bocage vendéen .....	309
Géologie .....	310
Les sols du bocage .....	310
Répartition des sols dans le paysage .....	311
Conclusion .....	312
<b>Chapitre 13. Les Vosges</b> .....	313
Cadre géographique .....	313
Climat .....	313
Végétation .....	314
Géologie – Géomorphologie .....	314
Le socle comporte trois grandes catégories de roches .....	315
La couverture permo-triasique .....	315
Les terrains quaternaires .....	316
Les régions naturelles .....	317

Les Basses-Vosges .....	317
Les Hautes-Vosges .....	318
Évolution pédologique dans les Vosges .....	318
Sols des Basses-Vosges .....	319
Quelques grands traits caractéristiques .....	319
Les matériaux originels .....	320
Pédogenèse et sols des Basses-Vosges .....	320
Sols des Hautes-Vosges .....	323
Quelques grands traits caractéristiques .....	323
Morphogenèses anciennes .....	323
Évolution actuelle .....	323
Pédogenèse et sols des Hautes-Vosges .....	324
Conclusions générales .....	328
<b>Chapitre 14. Le Massif central</b> .....	331
Les zones cristallines du Massif central .....	332
Caractères généraux des sols de roches granitiques et métamorphiques du Massif central .....	332
Le Limousin .....	333
Les Margerides .....	335
Les extensions ouest et sud-ouest du Massif central .....	337
Les reliefs cristallins des Marches limousines .....	337
Quelques éléments sur la région des Causses .....	340
La bordure est du Massif central .....	342
Le cadre géographique .....	342
Grands traits de la pédogenèse régionale .....	343
Les surfaces pénéplanées .....	345
La bordure nord du Massif central .....	347
Les enveloppes cristallines .....	347
Les nappes et placages détritiques .....	348
Les zones volcaniques du Massif central .....	349
Géologie .....	349
Géomorphologie .....	349
Pédogenèse .....	350
Conclusion .....	357
<b>Références bibliographiques</b> .....	359

#### PARTIE 4. LES SOLS DES MASSIFS RÉCENTS

<b>Chapitre 15. Les sols de haute montagne</b> .....	367
Les processus physiques et géochimiques en zone de haute montagne ..	368

Caractéristiques du milieu physique de haute montagne .....	368
La géologie et la géomorphologie .....	369
Les relations sols/roches .....	369
Climat .....	371
Végétation .....	371
Processus de pédogenèse – L'étagement altitudinal des sols .....	372
<b>Chapitre 16. Les Alpes du Nord</b> .....	375
Cadre géographique .....	375
Géologie .....	375
Réseau hydrographique .....	375
Climat .....	376
Paysages présentés .....	376
Le Mont-Blanc et les Aiguilles Rouges .....	376
Transect de la vallée de Chamonix .....	377
Séquence altitudinale des sols sur le versant Chamonix – Aiguille du Midi .....	377
Le Brévent .....	378
Col des Montets dans les Aiguilles Rouges .....	379
Le Beaufortain .....	380
Alpage de la Charmette .....	382
Le plateau des Saisies .....	384
Quelques remarques sur les paysages alpestres .....	385
<b>Chapitre 17. Les Pyrénées</b> .....	387
Le massif cristallin de Cauterets .....	388
Le gradient bioclimatique altitudinal .....	388
Aux altitudes les plus élevées .....	389
Le massif calcaire de la Pierre St-Martin .....	396
Importance des types de roches calcaires sur le fonctionnement des sols de haute montagne .....	396
Influence des autres facteurs du milieu .....	399
Distribution des sols dans les paysages calcaires du massif de la Pierre St-Martin .....	400
En conclusion .....	402
Le piémont pyrénéen .....	403
Bordure orientale des Pyrénées – Le massif des Albères .....	404
Géologie .....	404
Les sols .....	405
<b>Chapitre 18. Le Jura</b> .....	407
Le Haut-Jura .....	408

Géologie – Géomorphologie .....	408
Climat .....	408
Sols et paysages du Haut-Jura .....	409
Les principaux éléments de la pédogenèse dans le Jura .....	415
Les marges occidentales du massif jurassien .....	417
Cadre géographique .....	417
Géologie – Matériaux originels .....	417
Les sols .....	418
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>419</b>

## PARTIE 5. LES SOLS DES PAYS MÉDITERRANÉENS

<b>Chapitre 19. La Provence .....</b>	<b>425</b>
Cadre géographique .....	425
Réseaux hydrographiques .....	425
Données climatiques .....	425
La zone « côtière » .....	426
Géologie – Matériaux originels .....	426
Géomorphologie et sols .....	427
La zone « continentale » .....	429
Les grandes régions naturelles .....	429
Distribution des sols dans les pédopaysages .....	430
Quelques systèmes-sols de Haute Provence .....	437
En conclusion .....	444
<b>Chapitre 20. Le Languedoc-Roussillon .....</b>	<b>447</b>
Cadre géographique .....	447
Les basses plaines et terrasses quaternaires anciennes .....	447
Les plateaux et collines tabulaires .....	447
Les collines, versants et bassins de l'arrière pays .....	448
La partie orientale .....	448
Les régions naturelles .....	448
Géologie – Géomorphologie .....	449
Pédogenèse – Les sols .....	451
La partie centrale .....	453
Cadre géographique .....	453
Les régions naturelles .....	454
Les sols – Principaux traits de la pédogenèse .....	456
La partie occidentale .....	463
Les régions naturelles .....	463

Aperçu géologique .....	463
Les sols du Roussillon .....	464
En conclusion .....	465
<b>Chapitre 21. La Corse</b> .....	467
Cadre géographique – Une montagne dans la mer .....	467
Une montagne de Méditerranée .....	468
Climat .....	468
Végétation .....	468
Géologie .....	470
Histoire géologique .....	470
Structure de la Corse occidentale granitique .....	472
Structure de la Corse orientale alpine .....	473
Les sols de la Corse .....	474
La Corse occidentale .....	474
La Corse « alpine » .....	478
Le sillon central et la partie orientale .....	481
Les terrasses alluviales .....	482
Les sols des formations éoliennes et marines .....	485
Bilan des processus pédologiques en Corse .....	485
Décarbonatation .....	485
Brunification .....	485
Lessivage .....	486
Rubéfaction et fersiallisation .....	486
Podzolisation .....	486
Hydromorphie .....	487
En conclusion .....	487
<b>Références bibliographiques</b> .....	489

## PARTIE 6. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

<b>Chapitre 22. Éléments de synthèse et de références internationales (WRB) ..</b>	497
Caractères communs et dominants des sols des bassins sédimentaires ...	497
Sols de matériaux limoneux .....	497
Sols de matériaux calcaires .....	499
Sols de matériaux sableux .....	503
Sols de matériaux sablo-limoneux et limono-sableux .....	504
Sols de matériaux argileux et argilo-sableux .....	505
Sols de matériaux gréseux .....	506
Sols de matériaux alluviaux récents .....	506

Sols de matériaux alluviaux des terrasses anciennes .....	506
Caractères dominants des sols des plaines maritimes .....	507
Caractères communs et dominants des sols des massifs anciens .....	507
Sols de formations primaires .....	508
Sols de roches granitiques .....	509
Sols de roches métamorphiques .....	511
Sols de surfaces pénéplanées .....	511
Sols des formations du Secondaire et du Tertiaire .....	511
Sols des zones volcaniques .....	512
Sols du Quaternaire .....	514
Caractères communs et dominants des sols des chaînes et massifs récents	514
Sols de roches cristallines : granitiques et gneissiques .....	515
Sols de roches et matériaux calcaires .....	516
Considérations sur les Massifs récents .....	519
Caractères communs et dominants des sols des pays méditerranéens ....	520
Sols de roches cristallines : métamorphiques et granitiques .....	520
Sols de formations sédimentaires primaires .....	520
Sols de formations volcaniques .....	521
Sols de formations du Secondaire .....	521
Sols de formations du Tertiaire .....	523
Sols de formations du Quaternaire .....	524
Caractères dominants des sols de la Corse .....	524
<b>Chapitre 23. Conclusions générales</b> .....	527
Le sol, objet naturel spatialisé et composante essentielle du milieu physique .....	527
Le sol, ressource naturelle à préserver .....	528
Cadre international .....	529
Coordination européenne sur la connaissance des sols .....	529
Les sols du monde et une coordination mondiale .....	530
Les sols de France dans le contexte européen et mondial .....	531
Conclusions et perspectives .....	532
<b>Références bibliographiques</b> .....	535



# Avant-propos

---

Le but de cet ouvrage est de tenter une présentation synthétique des connaissances sur les principaux sols du territoire français et les ressources naturelles qu'ils représentent, ceci d'une manière la plus large possible et sous une forme plus paysagique que les publications traditionnelles traitant de ce thème, par ailleurs le plus souvent locales ou régionales.

Il s'agit en pratique d'une valorisation des travaux réalisés dans le cadre du levé, pendant plus de trente ans, de la *Carte pédologique de France*, coordonnée scientifiquement et gérée par l'Inra. De nombreuses feuilles ont été publiées, caractérisant un certain nombre de régions naturelles et couvrant une partie significative de la surface agricole utile. Pour transmettre l'information ainsi capitalisée, il nous a semblé logique de choisir un cadre mettant en évidence le fonctionnement d'unités de paysages parmi les plus typiques et faisant partie d'écosystèmes caractéristiques.

Une tentative de meilleure compréhension et de formulation de l'organisation des sols dans les paysages est effectuée, non plus seulement sur la définition des sols à partir de différentes taxonomies ou référentiels, mais basée sur les relations entre les constituants majeurs de la couverture pédologique, c'est-à-dire sur une vision spatiale de cette couverture. Il est connu que beaucoup d'ensembles spatiaux de sols correspondent à des systèmes organisés pour lesquels la distribution des types de sols n'est pas due au hasard mais étroitement liée aux lois d'évolutions géomorphologiques et pédologiques. Dès lors, il faut considérer que les différents types de sols ne sont pas des entités indépendantes, mais que leur position géographique relative indique le plus souvent des relations pédogénétiques dans l'organisation de la couverture pédologique. Cette structure spatiale influence le fonctionnement actuel, comme l'orientation et l'importance des flux verticaux ou latéraux d'eau et de matières. Ceci conduit à la notion de « systèmes sols » ou « systèmes pédologiques » liée, au sein des paysages, aux ensembles constitués par des toposéquences et des bassins versants d'amplitude variable.

Il existe un grand nombre de sols variés sur le territoire français. En effet, la Base de Données des Sols de France contient près de 1 000 types de sols regroupés, à la précision de 1/1 M, en plus de 300 unités cartographiques. Compte tenu de l'impossibilité de couvrir toute la variété de nos paysages dans un seul ouvrage, nous avons été conduits à faire une sélection sur les bases suivantes.

Les grands processus pédogénétiques fondamentaux qui régissent l'évolution des formations superficielles du territoire peuvent aisément être mis en évidence. Ces processus dominants sont essentiellement la brunification et le lessivage, et à un degré moindre, la podzolisation et l'andosolisation. Cependant, lorsqu'un



facteur prépondérant intervient dans la genèse, d'autres types d'évolution peuvent intervenir : teneur importante en calcaire, excès d'eau.

Parmi les différents facteurs de la genèse, trois d'entre eux prennent, de manière évidente, une importance plus grande dans l'évolution des sols de France, comme dans beaucoup d'autres régions d'ailleurs : tout d'abord le *contexte géo-lithologique*, ensuite le *contexte géomorphologique*, enfin les *influences climatiques et paléoclimatiques*.

De ce fait, trois grands types de domaines physiographiques peuvent tout d'abord être envisagés : les massifs anciens d'âge hercynien, les chaînes récentes d'âge tertiaire et les grands bassins sédimentaires. De plus, deux autres domaines spécifiques s'individualisent particulièrement bien : les plaines maritimes et les zones situées sous climat méditerranéen. C'est au sein de ces grandes unités naturelles qu'ont été inventoriés et décrits différents types de systèmes pédologiques ou systèmes-sols.

De nombreux travaux d'inventaire cartographique ont montré l'existence d'organisations répétitives de sols dans beaucoup de paysages. Les notions de paysage pédologique et de séquence de sols font référence aux critères morphologiques et/ou pédogénétiques à l'origine de la différenciation spatiale des sols. Certains facteurs de la genèse s'avèrent particulièrement importants dans la définition de séquences. On peut notamment citer les lithoséquences s'il s'agit du matériau parental, les toposéquences s'il s'agit du relief, les chronoséquences s'il s'agit du facteur temps.

Une préoccupation de typologie des paysages pédologiques nous a conduit à privilégier en un premier temps les séquences de sols les plus évidentes au plan spatial, toposéquences pour lesquelles la différenciation est fréquemment liée à un fonctionnement. C'est ce type de pédopaysage, dont l'étude permet d'inventorier et de décrire des systèmes-sols, que nous observons le plus souvent. Il s'avère que l'unité de modelé de référence au plan géomorphologique est constituée par le bassin versant et qu'indépendamment des transferts verticaux, l'observation des transferts latéraux – de surface, hypodermiques, de profondeur – est fondamentale à prendre en compte pour la compréhension du fonctionnement de différents systèmes.

Il nous a semblé nécessaire, pour la bonne compréhension d'un certain nombre de données, d'effectuer quelques rappels d'éléments de base de la pédologie de terrain, qui font l'objet des premiers chapitres et auxquels nous faisons référence par la suite : notion de couverture pédologique, principaux facteurs de la formation des sols, niveaux d'organisation, description des sols, et principaux processus de la pédogenèse sous climat tempéré humide et méditerranéen.

La structure retenue pour cet ouvrage comprend ensuite différents chapitres concernant les principales régions naturelles dépendant d'une part des grands bassins sédimentaires, d'autre part des massifs anciens, des chaînes récentes et enfin des pays méditerranéens.

La présentation des sols dominants des grands paysages pédologiques évoqués et des différents écosystèmes qui les caractérisent est illustrée par un nombre important de séquences, blocs diagrammes et schémas explicatifs sur la distribution et le fonctionnement des sols, par quelques extraits de cartes, ainsi que par de nombreuses photographies qui sont intégrées dans un cédérom associé à la publication. Les données analytiques essentielles des principaux types de sols mentionnés sont reprises en

référence dans des ouvrages et publications qui sont indiqués à la fin de chaque chapitre, sous l'intitulé : « Pour en savoir plus ».

Les termes de dénomination des sols utilisés dans cet ouvrage sont ceux du *Référentiel pédologique* publié en 2008. Ce système, basé essentiellement sur une typologie, consiste en : une liste d'horizons de référence dont il est fourni une définition et une caractérisation précises ; une collection de solums de référence définis par des superpositions d'horizons ; une liste de termes, définis également avec précision, qui, ajoutés au nom de la référence, permettent de fournir nombre d'informations supplémentaires. Chaque unité typologique et chaque unité cartographique sont ainsi rattachées à une ou plusieurs catégories du référentiel. Ce système constitue donc un langage qui permet à tous les pédologues d'échanger des informations de manière claire.

Une coordination entre ce référentiel français et le système de référence international WRB est présentée en fin d'ouvrage. Notons que les anciennes dénominations de la CPCS seront de temps à autres évoquées, soit dans le texte, soit dans la légende de schémas, pour faciliter la compréhension de personnes moins averties.

C'est en tentant une présentation ainsi structurée, dynamique et plus paysagique de nos connaissances sur les ressources en sols de notre territoire que nous avons pensé faire œuvre nouvelle et utile.

Il convient immédiatement de signaler que cet ouvrage doit beaucoup à de nombreux collègues qui ont relu, modifié et corrigé un certain nombre de chapitres issus notamment de leurs travaux et pour lesquels leurs compétences étaient irremplaçables. Aussi tenons-nous à exprimer notre gratitude à Mmes J. Demartini, M. Eimberck, M. Gaiffe, à MM. D. Arrouays, D. Baize, J.-C. Begon, M. Bornand, Y.-M. Cabidoche, J. Chrétien, J. Dejou, P. Faivre, J.-P. Favreau, L. Florentin, M. Gury, R. Hardy, D. King, J.-P. Legros, J.-P. Party, J.-M. Rivière, J. Roque.

Ma dette de reconnaissance personnelle est très grande à l'égard de Micheline Eimberck et de Sacha Desbourdes qui ont largement collaboré à la réalisation de ce projet, que ce soit Micheline pour les aspects scientifiques, en relisant et corrigeant l'ensemble du manuscrit, ou Sacha pour tous les aspects techniques et informatiques liés à l'illustration. Dans ce dernier domaine, nous remercions également Christine Le Bas et Gérard Yart pour leur aide efficace.

Les pages qui suivent retracent l'intégration de différentes étapes dans l'évolution des conceptions jusqu'à la situation actuelle, et esquissent les perspectives qui se présentent à nous. On y retrouve de ce fait des données extraites de mises aux points ou de publications effectuées en collaboration avec nos collègues français spécialisés dans l'analyse spatiale en pédologie.

Nous tenons donc à remercier ici tous les pédologues cartographes de notre unité et des organismes collaborateurs du SESCOF et d'Infosol pour leur participation aux acquisitions des résultats qui vont être évoqués, pour leur aide et pour les idées provenant de leurs travaux. Les collègues de l'Inra ont été nombreux : P. Barthès, P. Berché, M. Berland, P. Bonfils, M. Bonneau, L. Boulonne, G. Callot, P. Courtemanche, R. Darthout, P. Dutil, O. Duval, J.-C. Favrot, H. Gaillard, A. Guyon, R. Hardy, M. Isambert, C. Jolivet, B. Laroche, C. Le Lay, S. Lehman, F. Le Tacon, J. Maucorps, J. Moinereau, B. Nicoulaud, B. Renault, A. Richer de

Forges, R. Salin, J. Servant, R. Studer, J. Wilbert, G. Yart,... ; d'autres dépendaient d'organismes de recherche, d'enseignement et d'unités universitaires : S. Bruckert, M. Crahet, J. Ducloux, J.-M. Hetier, P. Horemans, D. Righi, J.-P. Rossignol ; d'autres encore avaient leurs activités au sein de sociétés d'économie mixte ou de chambres d'agriculture : H. Arnal, P. Benoit-Janin, L. Bliet, R. Bouttemy, G. Bouteyre, G. Duclos, C. Fléché, J.-C. Lacassin, C. Mathieu, J. Portier, J. Seguy, J.-L. Solau,... Ceci bien entendu sans oublier les relecteurs cités plus haut.

Nos remerciements s'adressent également aux nombreux amis pédologues de renom, responsables scientifiques ou collègues qui, par leurs travaux, leurs interventions ou les conversations que nous avons pu avoir tout au long de ces années ont contribué au succès du SESCOF et d'Infosol. Nous pensons aux professeurs G. Aubert, J. Boulaine, M. Bournerias, C. Cheverry, F. De Coninck, P. Duchaufour, B. Gèze, S. Hénin, A. Herbillon, F. Jacquin, C. Mathieu, C. Pomerol, A. Ruellan, E. Servat, R. Tavernier, mais également à Mme S. Mériaux, MM. R. Bétrémieux, G. Drouineau, J. Chaussidon, J. Hébert, J. Mamy, G. Pedro, J. Poly, J.-C. Remy, P. Stengel, enfin à A. Bruand, Y.-M. Cabidoche, E. Dambrine, J. Daroussin, N. Fedoroff, M.-C. Girard, J.-M. Hetier, C. Le Bas, P. Quantin, M. Robert, D. Tessier, F. Van Oort, N. Saby,...

Peut-être ai-je oublié certaines ou certains, auquel cas j'espère qu'ils voudront bien m'en excuser.

Merci aussi à celles qui ont contribué depuis de nombreuses années à la gestion de notre unité : Mmes M. Soler, M. Marolleau et M.-P. Poussineau.

Nous ne voudrions pas oublier ici les spécialistes de Quae, qui par leur amabilité, leur compréhension, leur compétence et leur efficacité ont permis la mise en forme du travail réalisé. Merci à tous.

Nous nous permettrons de terminer cet avant propos en remerciant très chaleureusement Dominique ARROUAYS, directeur d'Infosol, et, avec beaucoup de tristesse et de nostalgie, Dominique KING, alors président du centre de recherches Inra d'Orléans, qui vient malheureusement de nous quitter, pour leurs remarques constructives et le soutien continu apporté à leur « ancêtre ». Ils ont accepté tous deux de rédiger la préface de cet ouvrage, que nous pensons en phase avec les préoccupations actuelles des responsables des recherches et de leurs applications en science du sol.

## Partie 1

---

# Observation et analyse des couvertures pédologiques

## Chapitre 3

---

# Principaux processus de la pédogenèse en France

Indépendamment des processus d'*altération* et de *structuration pédologique* initiale, intervient un double phénomène. Sous l'effet des transferts d'eau au sein de la couverture pédologique et en fonction des conditions du milieu, on peut observer un appauvrissement des couches superficielles en certains constituants, un enrichissement concomitant des couches sous-jacentes jouant le rôle de structure d'accueil pour les migrants, qu'ils soient en solution, colloïdaux ou particuliers.

Ces mécanismes confèrent aux structures de *départ* et d'*accueil*, des morphologies et des propriétés différentes qui sont généralement spécifiques des matériaux où ils sont intervenus.

La nature des dynamiques enregistrées au cours de la pédogenèse dépend beaucoup de la topographie. Les transferts de particules et d'éléments chimiques s'effectuent essentiellement verticalement lorsque le sol se développe sur une surface plane à sub-plane, le plus souvent transversalement sur versant.

### ►► Différenciation verticale et latérale

Les conditions ayant présidé à la différenciation des sols (origine des matériaux, mode de mise en place, importance des altérations, évolution physico-chimique et biologique) y ont induit une double différenciation dans leur *organisation verticale* et dans leur *répartition spatiale*. La première correspond à la notion traditionnelle de *profil de sol* telle que nous l'avons décrite, la seconde ne peut s'appréhender qu'en observant et analysant des *toposéquences* paysagiques, en étudiant suffisamment finement les relations qui existent entre les différents profils de sols se succédant sur un versant. L'importance relative de ces deux modes de différenciation est naturellement liée à l'orientation des transferts d'eau, de solutés et de particules responsables en grande partie de l'évolution des couches de surface.

## ►► Pédogenèses climatique et stationnelle

L'examen des caractéristiques du sol permet au pédologue de discerner quels facteurs ont joué le rôle le plus déterminant dans la formation du sol. Soit que ces facteurs aient toujours primé sur les autres, soit que leur action se soit exercée sur une durée plus longue.

C'est ainsi que dans les régions du globe où le climat est à la fois bien tranché et stable depuis longtemps (100 000, voire plusieurs millions d'années), les sols présentent partout de mêmes grandes organisations pédologiques. Ainsi, en région tropicale, un granite et un grès ont subi une altération et un appauvrissement très intenses ; ils donnent tous deux naissance à une latérite (ou ferrallite) et ne se distinguent guère que par quelques caractères mineurs. D'un autre côté, ces mêmes roches donnent naissance à un podzol dans le nord de la Russie, sous climat sub-boréal. Dans les deux cas, on parle de « sols zonaux » pour rendre compte de cette zonalité pédologique calquée sur celle des bioclimats. Et les « grands modes de pédogenèse » qui leur correspondent sont appelés ici ferrallitisation, et là podzolisation.

Dans un pays tel que le nôtre, à climat tempéré, où l'évolution des sols ne s'est marquée que depuis la fin de la dernière période glaciaire, l'effet du bioclimat se traduit essentiellement dans le caractère modéré des altérations et un rôle significatif des activités biologiques. La majeure partie des caractères du sol sont en fait imposées par la nature des matériaux originels ou des conditions stationnelles liées au modelé et au pédoclimat. Ceci indépendamment de sols fossiles et paléosols.

De plus, certains matériaux ou situations topographiques peuvent présenter un caractère suffisamment extrême pour orienter entièrement l'évolution du sol (tels les matériaux très argileux ou très riches en sels, ou des secteurs marécageux soumis en permanence à un excès d'eau). Auxquels cas on parle de « sols azonaux » ou « stationnels », et les grands modes de pédogenèse s'appellent ici « vertisolisation », « salinisation », « hydromorphie », etc.

Plusieurs catégories de processus de la genèse des sols doivent être évoquées. Toutes sont étroitement dépendantes à la fois de la nature des roches mères et des conditions pédoclimatiques qui intègrent le climat et la végétation. Indépendamment de l'incorporation de la matière organique et des phénomènes d'humification, les deux catégories principales sont celles qui regroupent respectivement les *mécanismes d'altération* et les *phénomènes de redistribution de matière*.

## ►► Processus dominants des milieux tempérés et humides

### Altération et brunification

Il est possible de distinguer ici des *mécanismes d'altération physique et géochimique*. Les premiers sont responsables du fractionnement de la roche initiale sous l'effet de phénomènes tels que les cycles humectation/dessiccation et gel/dégel. Ce fractionnement peut aller jusqu'à une microdivision générant des fractions de plus



en plus fines : sableuses, limoneuses, et de la dimension des argiles ( $< 2 \mu\text{m}$ ). Les seconds ont alors leur tâche facilitée par l'augmentation des surfaces disponibles pour une agression physico- et géochimique due à l'action des eaux chargées de diverses substances acides, notamment d'origine organique.

Les matériaux calcaires subissent, quant à eux, une décarbonatation plus ou moins rapide en fonction de leur cohérence, générant une couche d'altération constituée des résidus insolubles, antérieurement prisonniers dans la roche originelle.

L'action successive ou conjuguée de ces mécanismes provoque une première *homogénéisation* du matériau, faisant ainsi disparaître les structures lithologiques initiales pour les remplacer par une *structuration pédologique* comme nous l'avons décrit plus haut.

Un relais est alors pris très rapidement par les différentes activités biologiques : enracinement lié à la colonisation par la végétation, actions fauniques et microbiologiques, conduisant éventuellement à d'autres types de structuration. La *matière organique* libère donc des composés humiques qui forment, avec les éléments issus de l'altération, des complexes organo-minéraux, de nature très variable, et qui confèrent au sol un grand nombre de ses propriétés.

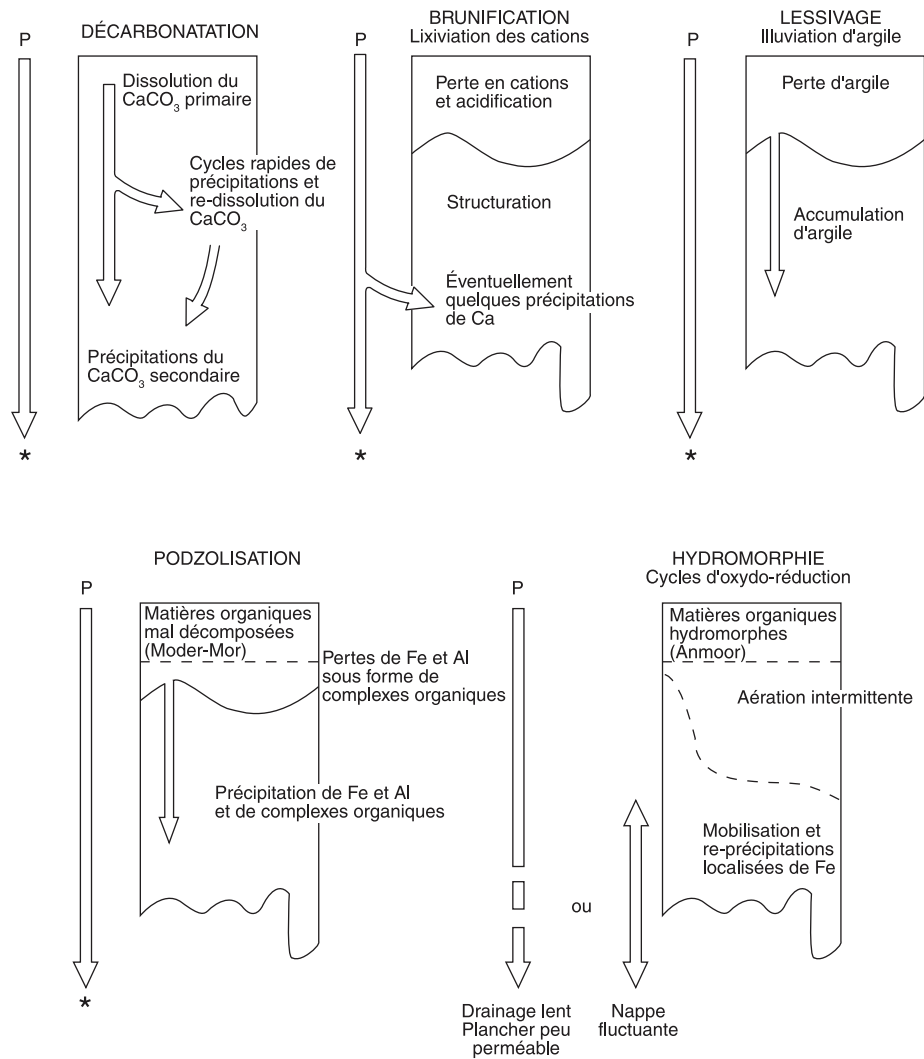
Le processus dit de *brunification* correspond à une altération ménagée, principalement sous ce climat tempéré humide, des minéraux primaires de la roche-mère. Le milieu est faiblement acide et les structures cristallines des minéraux sont peu affectées. La genèse de minéraux argileux de type 2/1 est typique de ce qu'on appelle la « bisiallisation ». Une partie des bases libérées lors de l'altération géochimique sont éliminées dans les eaux de percolation, tandis qu'une libération modérée d'oxydes de fer intervient. L'association de ces oxydes avec la fraction argileuse et les matières organiques humifiées (humus de type mull) confère au sol une teinte brune caractéristique qui justifie les appellations « sols bruns » et « brunification » (Photos PED 01, 02).

## Redistribution de matière

Sous l'effet des transferts d'eau au sein de la couverture pédologique et en fonction des conditions de milieu, un appauvrissement des couches superficielles en certains constituants peut intervenir, ces constituants étant soit éliminés hors des solums, soit, et c'est fréquemment le cas, accumulés en sous-sol à des niveaux variables. Il y a donc, comme nous l'avons déjà évoqué, *migration* de constituants sous forme soluble, sous forme colloïdale, ou sous forme particulière, aux dépens de *structures de départ* qui vont en s'appauvrissant, et *accumulation* dans des couches sous-jacentes jouant le rôle de *structures d'accueil*.

Ces phénomènes conduisent à deux des processus de pédogenèse parmi les plus connus : le *lessivage* et la *podzolisation* (figure 3.1).

Le *lessivage* est un processus d'entraînement mécanique, par les eaux de gravité, des argiles fines et des hydroxydes de fer qui leur sont associés, depuis les horizons supérieurs (*éluviaux* : appauvris et décolorés) vers les horizons profonds (*illuviaux* : enrichis et plus colorés). Ces derniers sont caractérisés morphologiquement par la présence de « revêtements » argileux qui enrobent la majorité des agrégats structuraux (Photo PED 03).



**Figure 3.1.** Présentation schématique de processus pédogénétiques des climats tempérés (d'après McRae, modifié et actualisé).

Sont schématisés les processus de décarbonatation, brunification, lessivage, podzolisation et hydromorphie (P : précipitations, \* Entraînement des bases dans les eaux de drainage).

La *podzolisation* est de *caractère climatique* dans les régions du globe où des températures basses sont un frein à la décomposition des matières organiques : la zone boréale, les régions de haute montagne. Dans l'horizon humique (mor ou moder), des acides organiques, solubles et aptes à se complexer, se forment en abondance. Ils provoquent la destruction des minéraux altérables et entraînent en profondeur, sous forme de complexes organo-minéraux, les éléments issus de cette destruction. L'horizon immédiatement au-dessous de l'horizon humifère prend un aspect cendré dans les cas les plus caractéristiques, tandis que les horizons sous-jacents se distinguent par les teintes plus sombres (brune, noire et rouille) des complexes organo-minéraux qui y précipitent en se polymérisant (Photo PED 04).

La podzolisation se manifeste également sous climat tempéré, mais comme un *processus stationnel* dans la mesure où c'est essentiellement la nature du matériau qui en est la cause. C'est le cas des sables quartzeux sédimentaires, pauvres chimiquement et très filtrants, et secondairement des arènes des roches cristallines les plus acides. En fait, cet effet matériau se trouve le plus souvent renforcé du fait d'une



pluviométrie élevée ou d'une végétation dite acidifiante de type lande à bruyères ou forêt de résineux. L'intensité de la pédogenèse est variable : soit une podzolisation forte conduisant aux sols les plus différenciés, de type sol podzolique ou podzol, comme sur la majorité des formations sédimentaires de l'Europe de l'Ouest, soit une podzolisation modérée conduisant à la genèse de sols podzoliques ocreux et moins différenciés, comme c'est le cas en général dans les altérites développées aux dépens des roches cristallines des massifs collinaires et montagnards.

Ces mécanismes confèrent aux structures de départ et aux structures d'accueil des morphologies et des propriétés différentes, qui sont généralement spécifiques des matériaux où ils sont intervenus. En effet, le résultat de ces redistributions ne sont pas les mêmes lorsqu'elles affectent des matériaux calcaires ou non calcaires à l'origine, des dépôts sableux, des formations limoneuses ou des sédiments argileux. On retrouve donc ici également l'influence prépondérante des matériaux originels.

## Autres processus

La *vertisolisation* s'observe dans des matériaux très argileux à argile gonflante de type smectitique. Pour peu que les conditions saisonnières du climat soient suffisamment contrastées, les alternances d'expansion et de retrait des argiles induisent une dynamique structurale particulière caractérisée par de larges fentes de retrait en saison sèche et l'existence de faces structurales obliques et luisantes dues au glissement des agrégats les uns contre les autres (*slickensides*). En milieux tropicaux, la surabondance de silice, magnésium et calcium dans ces milieux confinés à pH élevé conduit à la néoformation d'argiles de type montmorillonite.

Par effet de brassage (*self-mulching*), la matière organique subit ici une « maturation » particulièrement intense qui confère au sol une teinte générale sombre (Photo PED 05).

La *salinisation* et la *sodisation* correspondent à un ensemble de processus liés à l'action du sodium. Ce dernier se présente soit sous forme dissoute dans des solutions salines conduisant à la formation de sols salés (salinisation proprement dite), soit sous forme échangeable avec saturation importante du complexe adsorbant (sodisation). Une désaturation partielle, sous l'effet des eaux douces de précipitations, peut conduire à une dégradation manifeste de la structure (alcalisation). Un lessivage marqué peut dans certains cas intervenir, conduisant à la différenciation de sols du type Solonetz. Enfin, il faut citer les sols sulfatés acides, très ponctuels sous climat tempéré, et liés à certains marais maritimes. L'oxydation des sulfures de fer y génère la présence de sulfates (jarosite) et une acidité extrême (pH inférieur à 3,5) (Photo PED 06).

L'*andosolisation* est un processus caractéristique des sols issus de roches volcaniques basiques plus ou moins cohérentes, allant des cendrées volcaniques aux roches basaltiques.

Les andosols sont caractérisés par la formation de produits silico-alumineux et ferri-fères, hydratés, amorphes, les « allophanes », complexés et stabilisés par l'humus. Les propriétés remarquables en sont les suivantes : une structure floconneuse, soufflée en grumeaux fins (dite aussi *fluffy*), d'où une faible densité apparente et une très grande porosité ; un toucher gras (ou onctueux) et fluant à l'état humide (propriétés

dites « thixotropiques ») ; une texture d'apparence limoneuse et une couleur brun-noir due à l'abondance de matière organique ; une forte rétention de l'eau.

De nombreux sols présentent, comme nous le verrons plus loin, une évolution intermédiaire entre andosolisation et brunification (Photo PED 07).

## Hydromorphie

Le processus dit d'hydromorphie est lié à la présence temporaire ou permanente d'un excès d'eau. Il est caractérisé par la réduction et la ségrégation locale de fer libre, due à une saturation des pores par l'eau.

Un engorgement prolongé de la porosité du sol induit un déficit en oxygène et donc une ambiance réductrice. La conséquence la plus visible en est la réduction du fer sous sa forme ferreuse, qui se signale par des teintes allant du gris au gris bleuté. En outre, cette forme ferreuse est mobile, parce que soluble, et peut donc migrer à l'intérieur du sol avec l'eau. En phase de ressuyage, certaines portions du sol s'assèchent plus rapidement et engendrent, par oxydation, des précipitations de fer sous sa forme ferrique couleur rouille. Il en résulte que les zones du sol soumises à de telles alternances de conditions réductrices et oxydantes, notamment la zone de battement d'une nappe, présentent le plus souvent une marqueterie de taches grises et rouille. On parle « d'horizon de pseudogley ».

L'hydromorphie temporaire est fréquemment associée à d'autres processus de pédogenèse provoquant une différenciation structurale ou texturale, et intervient postérieurement ou simultanément.

L'hydromorphie permanente, associée à des nappes le plus souvent profondes et très réductrices, est caractérisée par un maintien du fer à l'état ferreux, ce qui confère aux horizons correspondants une teinte gris-bleu à verdâtre généralisée.

Le terme de « gley » est réservé aux horizons soumis en quasi-permanence à un excès d'eau ; ils présentent une teinte uniformément gris-bleu (Photos PED 08-10).

Des critères morphologiques d'évaluation du régime hydrique des sols ont été progressivement établis, bien qu'étant variables en fonction des types de matériaux, et notamment de leur teneur en fer qui constitue le meilleur traceur de coloration. Ils reposent sur les caractères d'oxydo-réduction : couleur des taches et de la matrice, contraste, profondeur d'apparition, concrétions, etc.

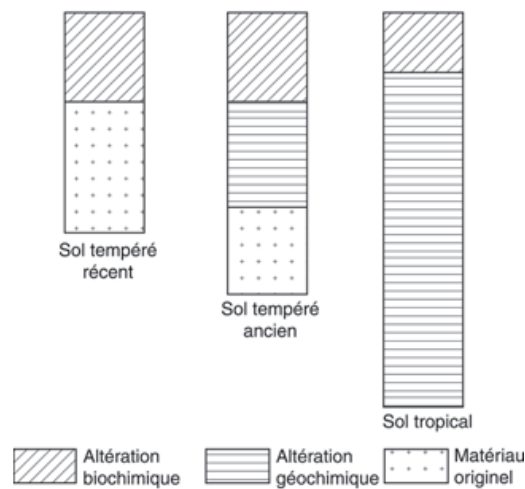
## ►► Processus dominants des milieux méditerranéens et intertropicaux

Ici, comme dans les milieux tempérés, les processus d'altération et de redistribution de matières se succèdent, avec, bien entendu, des possibilités de recouvrement (figure 3.2).

Deux principaux types d'altération sont à mentionner : la fersiallisation et la ferrallisation. Cette dernière n'est cependant mentionnée que parce qu'elle ne concerne, sous climat tempéré, que des paléosols.

La *ferralsitisation* est liée à des conditions climatiques à fort contraste saisonnier, méditerranéennes voire subtropicales. En milieu aéré et bien drainant, l'hydrolyse provoque une libération de fer importante. Les argiles qui se forment dans de telles conditions correspondent, tout comme en milieu tempéré, au processus de « bisiallisation » (genèse de minéraux argileux de type 2/1). La déshydratation plus marquée que subit le fer en saison sèche est responsable de la couleur brun rouge à rouge des sols. Les sols sont dits pour cela *rubéfiés* et on les retrouve le plus souvent, dans le sud de l'Europe et en milieu méditerranéen, développés dans des matériaux dont une forte drainance favorise encore plus le phénomène (Photos PED 11, 12).

La *ferrallitisation* est caractéristique des climats tropicaux suffisamment chauds et humides. Une altération extrême des minéraux primaires provoque la libération, indépendamment de celle du fer, des oxydes d'aluminium, pendant que la silice est entraînée à la base ou hors des solums. Suivant les cas, il y a dominance de kaolinite néoformée (« monosiallisation » : genèse de minéraux argileux de type 1/1) ou bien ce sont les sesquioxydes d'aluminium qui deviennent dominants, sous forme de gibbsite (« allitisation »). On peut trouver bien entendu des cas intermédiaires, comme dans les « sols ferrugineux tropicaux » contenant de la kaolinite mais encore des minéraux 2/1. Les sols ferrallitiques sont des sols épais de plusieurs mètres où l'altération géochimique est très poussée et étalée sur des périodes de temps extrêmement longues (plusieurs millions d'années) (Photos PED 13, 14).



**Figure 3.2.** Schéma des types d'altération en climat tempéré et en climat tropical ou équatorial (d'après P. Duchaufour).

La dominance des processus biochimique et géochimique est significative dans les deux cas.

Dans de nombreuses situations, notamment en zones arides ou intertropicales, des concentrations importantes se produisent pour former des horizons d'accumulations fréquemment indurés pouvant couvrir des superficies considérables. Il peut s'agir de gypse ou de calcaire (encroûtements, croûtes, dalles compactes), de silice (duripans) ou de sesquioxydes de fer associés à l'aluminium et au manganèse (carapaces et cuirasses).

Nous verrons au sous-chapitre suivant, et tout au cours de l'ouvrage, l'importance très grande des *facteurs paléoclimatiques*.

Indépendamment des traces laissées par des *climats chauds* très anciens, beaucoup de formations superficielles actuelles montrent d'autres traces en relation avec des climats plus récents du Quaternaire et notamment des *périodes glaciaires* : cryoturba-tions, solifluxions, formations de pentes. Il convient d'en prendre le plus grand compte, notamment pour la lecture des paysages (Photos PED 15-18).

Des ouvrages et chapitres d'ouvrage traitant des processus de pédogenèse ont aidé à élaborer ce que nous venons d'exposer succinctement (Baize *et al.*, 1995 ; Begon *et al.*, 1989 ; Duchaufour, 1976 ; Dutil et Jamagne, 1995 ; Erhart, 1956 ; Gobat *et al.*, 2003 ; Jamagne et Eimberck, 2007 ; Legros, 2001 ; Legros, 2007 ; Mathieu, 2009 ; Pedro *et al.*, 1978 ; Robert, 1996 ; Ruellan et Dosso, 1983).

Différentes thèses, notes et articles scientifiques illustrent certains aspects pédogéné-tiques spécifiques concernant notamment l'humification (Brêthes *et al.*, 1995), l'évo-lution de l'espace poral (Chrétien, 1986), l'andosolisation (Faivre, 1988 ; Gury *et al.*, 2000 ; Hétier, 1975 ; Quantin, 2007), l'acidification (Party, 1999 ; Pedro et Scherer, 1974), l'appauvrissement et le lessivage (Baize, 1995 ; Jamagne et Begon, 1984), sur l'évolution des sols calcaires (Pedro, 1972 ; Ruellan, 1984), sur les relations évolu-tion/différenciation (Legros, 1982), sur les aspects géochimiques et minéralogiques (Brinkman, 1979 ; Pedro, 1968 ; Pedro *et al.*, 1969 ; Righi *et al.*, 1992).

## ►► Paléosols – Sols mono ou polyphasés

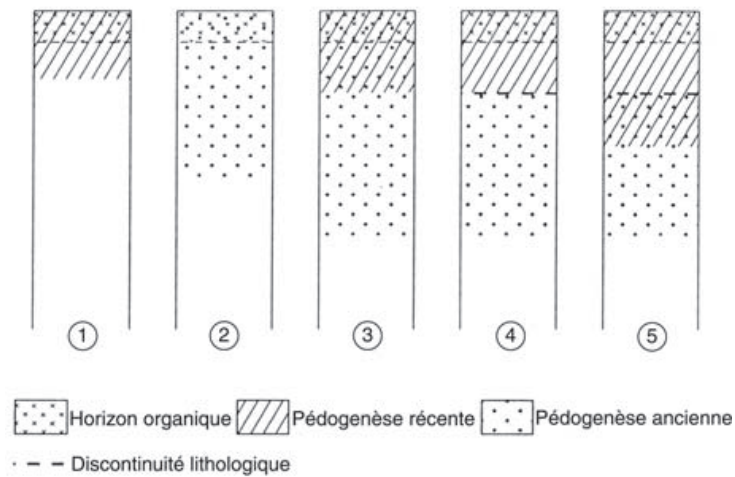
Les types d'évolution que nous venons d'évoquer brièvement ont concerné essen-tiellement les formations superficielles qui ont fait l'objet de processus pédologi-ques bien identifiés dont l'action s'est prolongée pendant une période variable, mais toujours, au plan géologique, relativement courte et récente : environ 10 000 ans.

D'autres sols, différenciés au cours de périodes antérieures du Quaternaire (glaciaires ou interglaciaires pour les territoires froids ou tempérés de haute ou moyenne latitude, pluviales et interpluviales pour les territoires tropicaux et équatoriaux) l'ont été sous des conditions climatiques bien différentes de celles existant actuellement (climat froid alternativement humide et sec, climat steppique, climats chauds, etc.) pendant lesquels dominant les mécanismes physiques ou l'emporte une intense altération chimique.

De tels sols sont définis comme *sols hérités* ou *paléosols*, à la fois anciens et inadaptés vis-à-vis de l'environnement actuel. Leurs caractéristiques sont sensiblement diffé-rentes de celles liées aux pédogenèses récentes et actuelles, ce dont témoignent traits morphologiques et propriétés physico-chimiques (Jamagne et Eimberck, 2007 ; Van Vliet-Lanoé, 1987).

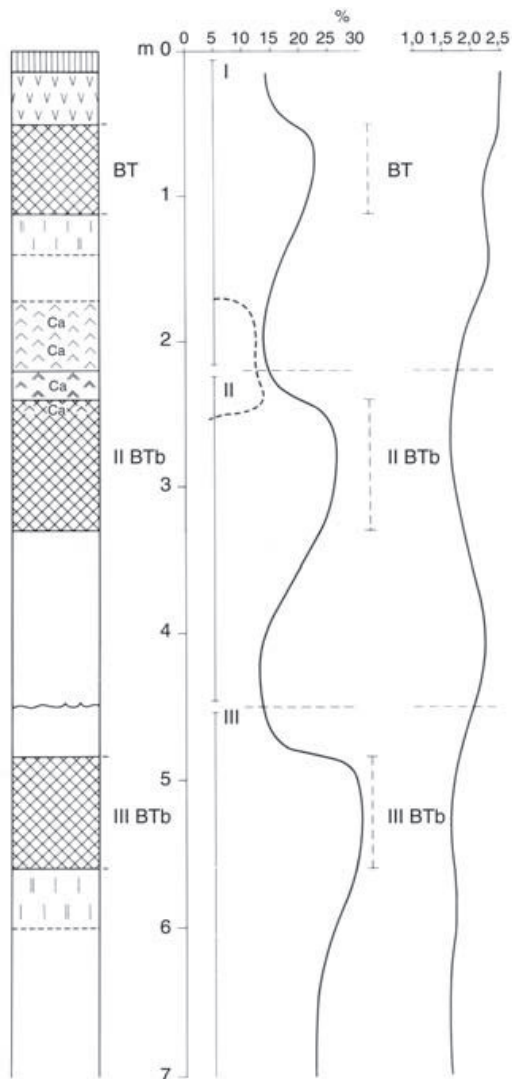
En fonction de dynamiques postérieures à leur genèse, ces paléosols peuvent exister sous différentes formes (figure 3.3) :

– rester en surface mais enregistrer de nouvelles conditions bioclimatiques : ils servent alors de matériel parental pour la nouvelle pédogenèse qui s'y développe. C'est le cas, par exemple, de la « terra rossa », matériaux plus ou moins rubéfiés sous climat à saison sèche marquée qui voit se superposer une « brunification » au profil initial. Ces sols sont considérés comme *polycycliques* ou *polyphasés* ;



**Figure 3.3.** Schéma de différents types d'évolution des sols (d'après Bos et Sevink, modifié par Duchaufour, 1977).

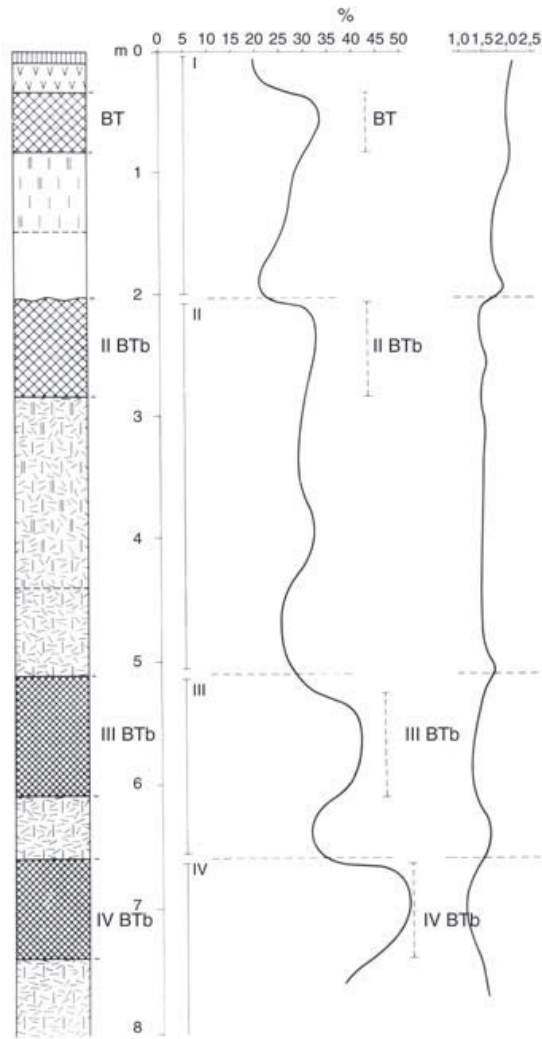
Ce schéma illustre la composition de différents types de sols lorsque deux types de pédogenèse ont participé successivement à leur évolution. ① Sol actuel de pédogenèse récente (profil simple) ; ② Sol ancien de pédogenèse liée à des conditions de milieux antérieures (profil simple) ; ③ Sol polycyclique ou polyphasé où la pédogenèse récente se surimpose au résultat de pédogenèses plus anciennes ; ④ Sol composé comportant une couche de surface à pédogenèse récente recouvrant une couche sous-jacente caractérisée par une pédogenèse ancienne ; ⑤ Sol complexe où la pédogenèse actuelle se surimpose à tout ou partie d'un paléosol sous-jacent.



**Figure 3.4.** Sol et paléosols de loess en Picardie et Soissonnais.

Les deux paléosols indiqués font partie du cycle du loess récent, c'est-à-dire de la période du Würm. Courbes de gauche : teneur en argile en trait continu, en calcaire en tireté. Courbes de droite : rapports limon grossier/limon fin.

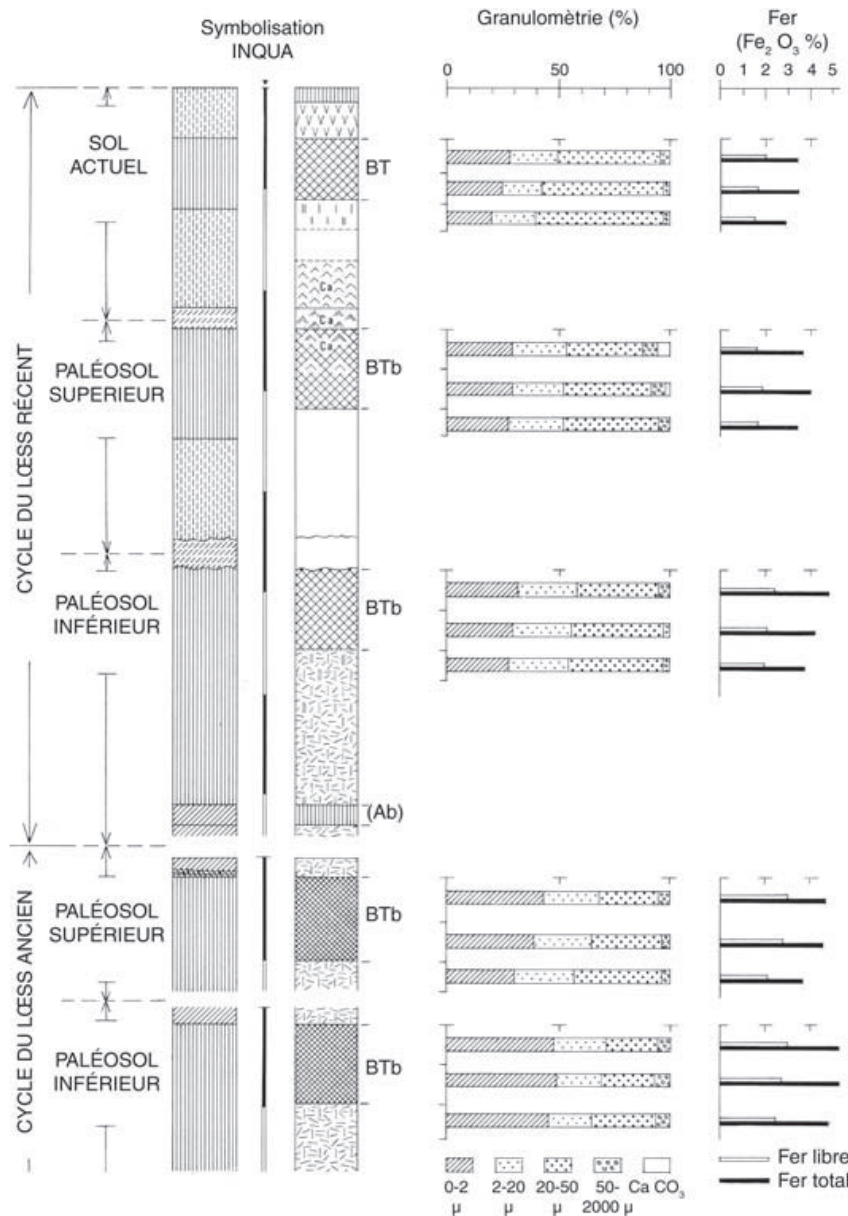




**Figure 3.5.** Sol et paléosols de limon loessique de la plateforme de Haute-Brie.

Le sol actuel et le premier paléosol (matériaux I et II) sont développés dans deux apports successifs de loess récent (Würm), tandis que les deux plus profonds (matériaux III et IV) appartiennent au cycle du loess ancien (Riss ou Mindel). Courbe de gauche : teneur en argile, courbe de droite : rapports limon grossier/limon fin.

- être recouverts par un dépôt relativement épais : on se trouve alors en présence d'un sol composé lorsque les deux cycles de pédogenèse affectant respectivement chacune des deux couches se trouvent séparés par une discontinuité. Si le processus récent atteint le paléosol en profondeur, le nouveau sol est dit *complexe* ;
- être enfouis sous une épaisse couverture sédimentaire : de tels sols sont dits fossiles. C'est le cas des nombreux sols développés sur loess (sols interglaciaires ou interstadias) sur grèzes, nappes alluviales, dépôts morainiques. La fossilisation a pu entraîner la troncature d'une partie plus ou moins importante des horizons superficiels de ces sols anciens, en particulier des horizons humifères et lessivés, plus fragiles parce que relativement moins structurés ;
- être *exhumés* par l'érosion, cas accompagnant fréquemment l'incision du réseau hydrographique et le façonnement des versants ;
- enfin, une très longue évolution, corrélative de celle d'anciennes surfaces d'érosion ou de dégradation lente, sans intervention notable de la tectonique génère des altérites, polygéniques pour la plupart, comme le sont les argiles à silex, les formations



**Figure 3.6.** Représentation des principaux paléosols limoneux du nord du bassin de Paris. Ce schéma théorique inclut quelques caractéristiques analytiques propres à chaque niveau.

sidérolithiques, certaines arènes granitiques, les profils cuirassés de la zone inter-tropicale sèche, etc.

Les figures 3.4, 3.5 et 3.6 illustrent la présence en profondeur de différents paléosols au sein de l'importante couverture limoneuse du nord-ouest du territoire.

Les paléosols des régions tempérées peuvent globalement être considérés comme appartenant à trois ensembles liés aux conditions paléoclimatiques ayant présidé à leur différenciation, à savoir soit un climat froid alternativement humide et sec, soit un climat steppique, soit un climat chaud.

Leurs caractéristiques sont bien entendu totalement différentes, et, respectivement : traces de l'influence du gel (phénomènes de cryoturbation et de fractionnement granulométrique), concentrations de matière organique, altération géochimique intense.

Des surfaces paysagiques anciennes, niveaux et plates-formes d'aplanissement le plus souvent, portent fréquemment la marque de processus climatiques d'évolution prononcés. Il s'agit notamment de vieilles arènes granitiques rubéfiées et de paléosols argileux rouges et bigarrés, comme le « sidérolithique » aux abords du Massif central français. Vraisemblablement développés au Tertiaire ou au Quaternaire ancien, les paléosols concernés sont le plus souvent à rattacher aux processus de ferruginisation et de ferrallitisation.

Ce que nous venons d'évoquer dans ces quelques lignes montre à quel point la prise en compte de la pédogenèse et la connaissance de l'histoire des sols, en tentant de remonter le temps pour la cerner et la reconstituer, sont indispensables à la compréhension de la diversité, de la valeur et de la répartition des ressources en sols. L'intervention de l'homme depuis quelques millénaires a profondément modifié ce que la nature avait mis longtemps à construire, apportant simultanément améliorations pour le cadre de vie des sociétés, mais également dégradations et destructions irréversibles.

## ► Séquences de sols et paysages pédologiques

De nombreux travaux de cartographie ont montré l'existence d'organisations répétitives de sols dans beaucoup de paysages, sans qu'il y ait nécessairement de relations particulières entre les sols voisins (Inra, 1969-2001).

### Critères de différenciation des séquences

Les notions de « séquence de sols » et de « paysage pédologique » font référence aux critères morphologiques et/ou pédogénétiques à l'origine de la répartition des sols : échelle et organisation spatiale pour les critères morphologiques, facteurs de différenciation, degré de relations et facteur temps pour les critères pédogénétiques (Jamagne et King, 2003).

Nous proposons de répertorier différents types de séquence sur ces critères.

#### L'échelle spatiale

Les sols constituant une séquence sont géographiquement proches. Cette proximité est cependant relative et peut couvrir des ensembles paysagiques d'ampleur variée, simple versant ou grandes régions naturelles. L'échelle d'investigation est ici un élément prépondérant de l'analyse.

#### Les facteurs de différenciation

Parmi les facteurs de la genèse, certains s'avèrent *dominants* dans la définition de différentes séquences. S'il s'agit :

– de la nature du *matériau parental*, on parlera de « lithoséquence » (pentes faibles recoupant des unités stratigraphiques contrastées, profondeur variable d'un substrat) ;



- du *relief*, on parlera de « toposéquence » (transferts de produits dissous ou de particules d'amont en aval) ;
- du *climat*, on parlera de « climatoséquence » (séquences océaniques à continentales, séquences altitudinales) ;
- de l'influence de *nappes d'eau*, on parlera d'« hydroséquence » (influence d'une nappe permanente, distance au collecteur hydrographique) ;
- du facteur *temps*, on parlera de « chronoséquence » (différenciation pédologique progressive de différents matériaux, origines géomorphologiques d'unités de modelés comme la succession de terrasses) ;
- et enfin, si l'action de *l'homme* est le facteur dominant, on parlera d'« anthroposéquence » (résultats de déforestations, apport ou exportation de matériaux, confection de terrasses agricoles).

Bien évidemment, plusieurs qualificatifs peuvent s'appliquer à la même séquence.

## Les relations des sols entre eux

Les relations de fonctionnement entre sols peuvent conduire à différentes séquences, mentionnées sous le terme de « catenas », et qui peuvent être (Sommer et Schlichting, 1997) une catena :

- de « transformation » : échanges verticaux mais pas latéraux de matière entre les sols et horizons de la séquence ;
- de « translocation » : échanges verticaux et latéraux de matière entre les sols et les horizons de la séquence ;
- de « perte » : exportation de matière pour l'ensemble des sols de la séquence (processus d'érosion par exemple) ;
- de « gain » : importation de matière pour l'ensemble des sols de la séquence (dépôts éoliens par exemple).

## Leurs organisations relatives

La prise en considération de cette organisation et des relations de fonctionnement nécessite une description de la structure spatiale tridimensionnelle des types de sols, et si possible des horizons. Des méthodes de description et d'expression des résultats de ces structures spatiales existent (Boulet *et al.*, 1995 ; EC-JRC, 1998 ; Fridland, 1975 ; King *et al.*, 1994b ; Ruellan *et al.*, 1989).

Ici intervient de manière très importante l'observation de la qualité des limites entre horizons qui peuvent être considérées comme des *fronts de transformation* lorsqu'elles représentent une phase importante d'une modification dans l'évolution du sol.

L'*âge de la différenciation* intervient bien entendu également. Les séquences peuvent être dénommées *résiduelles*, si héritées d'un processus d'âge ancien, ou *actuelles* si caractéristiques d'une pédogenèse active. Nombreuses sont celles intégrant ces deux aspects temporels. En effet, la formation d'un sol résulte pratiquement toujours d'un enchaînement de pédogenèses, chacune d'entre elles créant les conditions propices à l'apparition de la suivante. Ceci conduit notamment au concept de *phylum pédogénétique*.

La notion d'évolution séquentielle est donc fondamentale à prendre en compte pour la compréhension de la distribution spatiale des sols.

## La notion d'évolution séquentielle

Les plus fréquentes des séquences ainsi évoquées, étroitement liées à la dominance d'un facteur de la genèse, semblent être les séquences topographiques, lithologiques et chronologiques.

Nous évoquerons deux types de séquences qui, comme nous venons de le mentionner, apparaissent fréquemment dans beaucoup de paysages : les *séquences chronologiques* et les *séquences litho-topographiques*.

## Les séquences chronologiques

Les recherches menées sur les systèmes pédologiques et la succession dans le temps des processus qui ont été décrits plus haut ont notamment permis l'élaboration de séquences évolutives chronologiques, mettant en évidence :

- les transformations progressives subies par différents types de matériaux avec le temps ;
- les modifications, associées à ces transformations, dans l'importance des flux dominants au sein des organisations ainsi différenciées.

De l'étude de l'ensemble des sols développés sur un matériau bien défini, on peut déduire une séquence d'évolution pédogénétique progressive qui relie tous les stades caractéristiques observés.

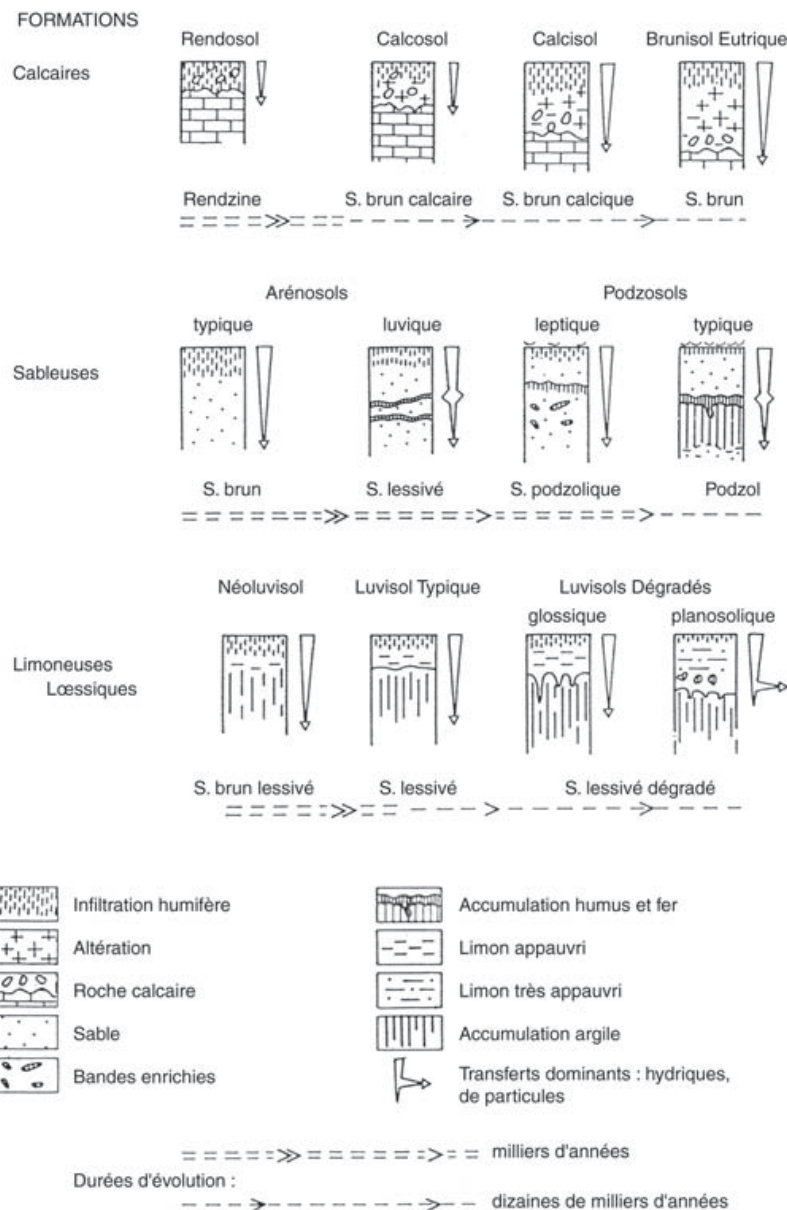
On peut concevoir par exemple l'évolution que peut subir un matériau loessique dans une telle série. Partant du loess calcaire, les processus de la pédogenèse l'amèneront successivement à des stades de plus en plus évolués : sol brun calcaire ou calcique, sol brun, sol brun faiblement lessivé, sol brun lessivé, sol lessivé glossique hydromorphe, à tendance planosolique dans certaines conditions.

Cette notion de chronoséquence pédogénétique, bien mise en évidence sur l'évolution des formations loessiques de l'ouest de l'Europe (Jamagne, 1973, 1978), a été soutenue par d'autres travaux reconstituant l'historique de l'altération et de la différenciation pédologique progressive d'autres types de matériaux. Son importance a été soulignée tant dans le domaine pédologique que dans le domaine pédo-géomorphologique (Bornand, 1978 ; Boulet *et al.*, 1995 ; Vreeken, 1984).

Les figures 3.7 et 3.8 proposent plusieurs exemples théoriques d'évolution chronologique de différents types de matériaux. Une orientation dominante des flux hydriques est esquissée, ainsi qu'une estimation des durées d'évolution.

## Les séquences topographiques

La grande majorité des formations sub-autochtones recouvrant des versants est affectée par un nombre important de transferts latéraux.



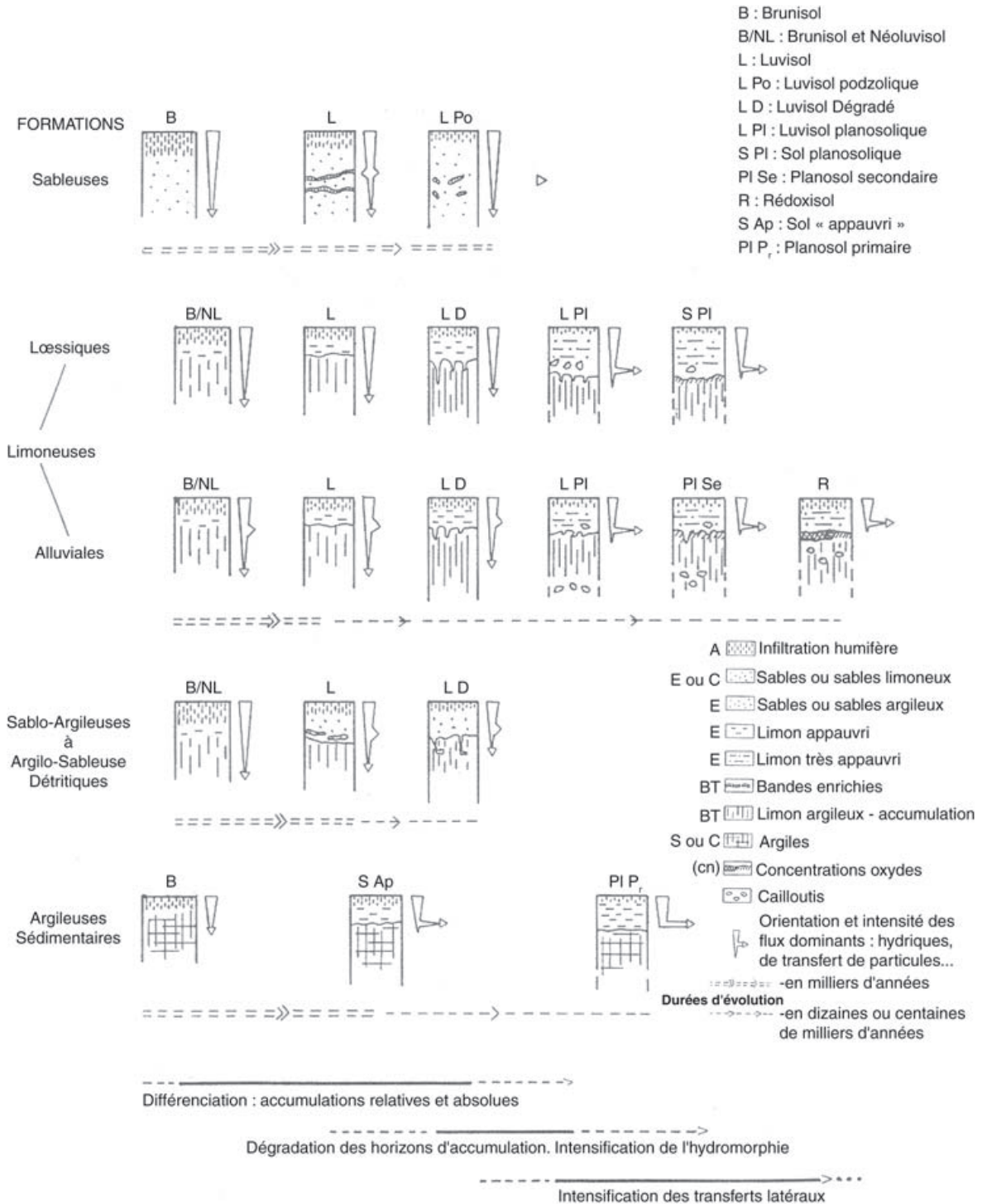
**Figure 3.7.** Quelques séquences chronologiques de pédogenèse.

Ces exemples, forcément simplifiés, concernent successivement des formations calcaires, sableuses et limoneuses. Dans le cas des formations sableuses, on peut passer directement du stade Arénosol au stade Podzsol.

Dans de nombreux paysages, le modelé du terrain génère une répartition spécifique des précipitations, se distribuant en écoulement de surface et infiltration. En fonction de la perméabilité des formations superficielles, les transferts de flux sont variables et induisent une différenciation par transport de matière en solution ou de particules en suspension.

Cette différenciation tant verticale que latérale est particulièrement explicative du fonctionnement des unités de paysage, et leur analyse détaillée a souvent permis de comprendre la répartition des sols sur les versants (figure 3.9).

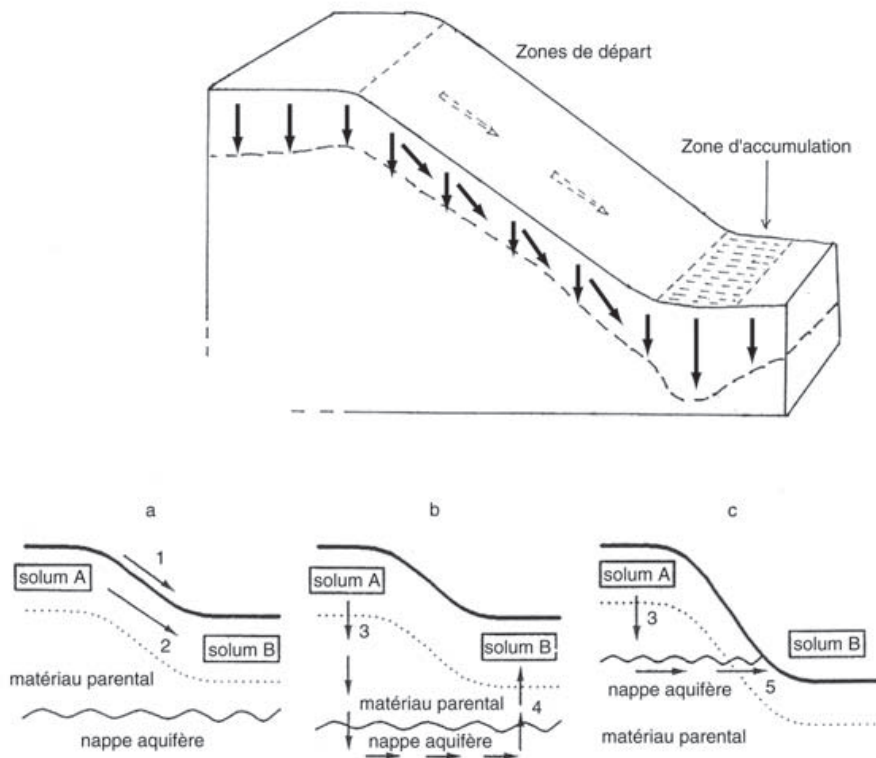
La nécessité est apparue progressivement, pour mieux comprendre l'organisation de la couverture pédologique, de prendre en compte des aspects plus dynamiques



**Figure 3.8.** Quelques séquences évolutives de lessivage.

Les exemples repris ici concernent les matériaux sensibles de manière significative aux processus de lessivage : sableux, limoneux loessiques et alluviaux, sablo-argileux et argilo-sableux, sédimentaires argileux.

concernant son fonctionnement, et de ce fait les relations de voisinage. En effet, il existe très souvent des interactions entre les éléments du milieu à l'origine de processus que nous appellerons *processus spatiaux*. Ceux-ci intègrent des espaces suffisamment grands et doivent être étudiés au niveau d'organisation auquel ils interviennent (Bocquier, 1973 ; Boulaine, 1986 ; Boulet *et al.*, 1982).



**Figure 3.9.** Esquisse des évolutions et fonctionnement des sols de versants en toposéquences.

Le premier schéma, très général, illustre les dynamiques hydriques tout au long de la séquence, modélisé avec rupture de pente : transferts verticaux et latéraux (hydriques, de particules, etc.). Les schémas inférieurs (d'après Sommer et Schlichting) montrent les liaisons directes (a) et indirectes (b, c) entre les sols (solum A et solum B) selon les différentes voies de transfert de l'eau : 1 écoulements de surface ; 2 écoulements latéraux de subsurface, hypodermiques ; 3 transferts verticaux ; 4 remontées capillaires ; 5 transferts de nappe.

Il s'avère donc que l'unité de modelé de référence est constituée par le bassin versant et que l'analyse des transferts latéraux (de surface ; hypodermiques ; de profondeur) est fondamentale à prendre en compte pour la compréhension du fonctionnement des unités de paysage.

Comme nous l'avons vu plus haut, la notion d'« Unité de Fonctionnement » est ainsi apparue : fragment d'unité de paysage ou de modelé dont on connaît l'organisation et le fonctionnement, et dont on peut préjuger la cinétique de transformation, avec toute l'importance que prennent ici les mécanismes et processus intervenant aux interfaces des ensembles organisés et notamment celle des « fronts de transformation » (Boulet *et al.*, 1984).

L'ajout de ce niveau d'organisation complémentaire est un moyen d'introduire la description des relations structurelles et fonctionnelles pouvant exister entre les différents sols.

Des essais ont été réalisés qui concernent la modélisation de ces structures spatiales (Bell *et al.*, 1994 ; King *et al.*, 1994a, 1994b) ainsi que celle de l'évolution des sols (Samouélian *et al.*, 2007).



## Les systèmes-sols – Bases possibles d'une typologie

Une préoccupation de définition des différents *paysages pédologiques* nous a conduit à privilégier en un premier temps les séquences de sols les plus évidentes au plan spatial, et qui sont les toposéquences pour lesquelles la différenciation est liée à un fonctionnement. C'est ce type de *soilscape* que nous considérons comme « systèmes-sols » et qui constituera la base de notre présentation des sols de France.

Une base de typologie des systèmes-sols devrait être trouvée à partir de l'expérience des travaux de la *Carte Pédologique* de France. Celle-ci a montré les nécessaires prises en compte successives au sein des toposéquences et bassins versants des paramètres dépendant des facteurs suivants : *géologie, géomorphologie, mode de mise en place des matériaux, formations superficielles, pédogenèse actuelle, pédogenèse ancienne*.

De même, la nature des systèmes rencontrés pourra être différente selon qu'ils se seront différenciés à partir du même type de matériau : *systèmes pédologiques*, ou à partir de matériaux différents : *systèmes topo-litho-pédologiques*.

L'« ampleur » ou extension des systèmes sera également importante à considérer. Ils pourront en effet être kilométriques, hectométriques, décamétriques ou même métriques.

Enfin, le fonctionnement actuel de ces systèmes pourra être *de surface, hypodermique, de profondeur*.