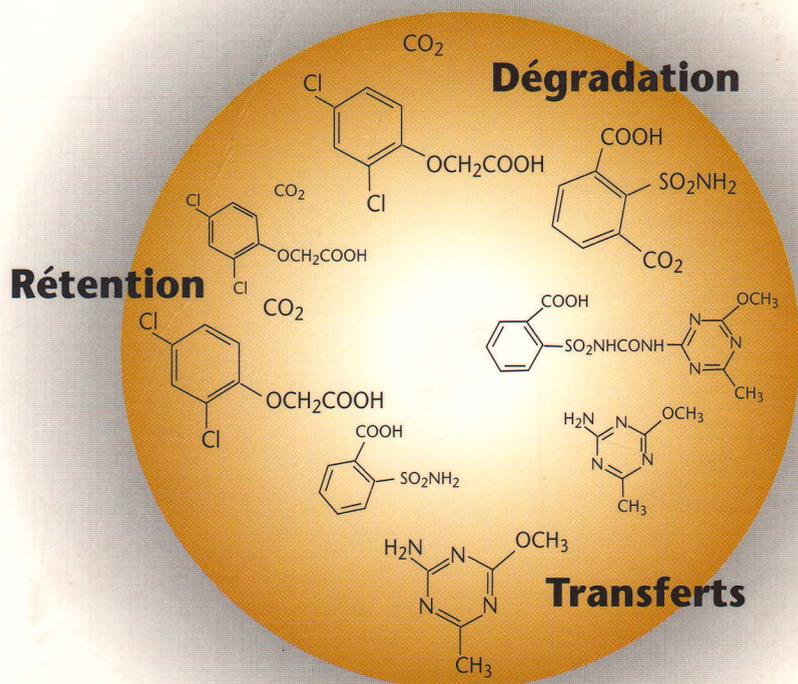


Les pesticides dans le sol

*Conséquences agronomiques
et environnementales*



Raoul Calvet,

E. Barriuso, C. Bedos, P. Benoit, M.-P. Charnay, Y. Coquet

Sommaire

INTRODUCTION	21
I QUELQUES ÉLÉMENTS D'HISTOIRE DES PESTICIDES	22
I-1 Les pesticides au XIX ^e siècle	22
I-2 Les pesticides au XX ^e siècle	23
II DEUX QUESTIONS SUR LES PESTICIDES	26
II-1 Quel est l'intérêt des pesticides?	26
II-2 Quelles sont les problématiques liées à l'utilisation des pesticides?	28
II-21 Les aspects technologiques	28
II-22 La pollution de l'environnement	29
II-23 Les problèmes toxicologiques et écotoxicologiques	32
III PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE	33
NOTES COMPLÉMENTAIRES	
NCInt-1 Définitions relatives aux pesticides	36
NCInt-2 Modalités d'utilisation des pesticides	39
NCInt-3 Ventes des produits phytosanitaires dans le monde en 2003	40
NCInt-4 La qualité des eaux concernant les pesticides	41
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	44
Première partie : Que sont les pesticides ?	
COMPOSITION, PROPRIÉTÉS ET ANALYSE DES PESTICIDES	47
Chapitre 1 Nature chimique des pesticides	49
CLASSIFICATION CHIMIQUE	49
CLASSIFICATION BIOLOGIQUE	51
CLASSIFICATION SELON L'USAGE	52
NOTES COMPLÉMENTAIRES	
NC1-1 Nomenclature des molécules organiques	61
NC1-2 Classification des principaux pesticides selon leur mode d'action	64

Chapitre 2 Propriétés des pesticides	69
I INTRODUCTION	69
II PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES	71
II-1 Propriétés relatives aux substances pures	71
II-11 La pression de vapeur	71
II-111 Quelques données thermodynamiques	71
II-112 Valeurs de la pression de vapeur des pesticides	74
II-12 La solubilité dans l'eau	76
II-121 Mécanisme moléculaire de la dissolution	77
II-122 Facteurs ayant une influence sur la solubilité	79
II-1221 Composition et structure chimique des pesticides	79
II-1222 Composition chimique de la phase liquide	80
II-12221 Le pH	80
II-12222 Les sels inorganiques dissous	80
II-12223 Les composés organiques dissous	82
II-1223 La température	82
II-123 Les valeurs de la solubilité des pesticides dans l'eau	83
II-2 Propriétés relatives aux substances dissoutes en milieux aqueux	85
II-21 Partage entre l'air et une solution aqueuse	85
II-211 Le coefficient de la loi de Henry	85
II-212 Valeurs du coefficient de Henry des pesticides	86
II-22 Partage entre un solvant organique et une solution aqueuse	88
II-221 Le coefficient de partage entre l'octanol et l'eau (K_{ow})	89
II-222 Relation entre le coefficient de partage octanol/eau (K_{ow}) et la solubilité dans l'eau (S_w)	91
III PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	93
III-1 Ionisation des molécules pesticides	93
III-11 Réactions d'ionisation et grandeurs caractéristiques	94
III-111 Les acides et les bases	94
III-112 Variation des proportions de molécules ionisées en fonction du pH	95
III-12 Structure des molécules et valeurs de la constante de dissociation	97
III-121 Les facteurs influant sur l'ionisation des groupes fonctionnels	97
III-122 Les valeurs des constantes d'acidité des pesticides	99
III-2 Hydrolyse des molécules pesticides	100
III-3 Réactions d'oxydoréduction des molécules pesticides	101
III-4 Réactions de minéralisation des molécules pesticides	103
IV PROPRIÉTÉS SPECTROSCOPIQUES	105
IV-1 Les domaines de longueur d'onde et les phénomènes associés	105
IV-2 Propriétés spectroscopiques dans les domaines ultraviolet et visible	107
IV-3 Propriétés spectroscopiques dans le domaine infrarouge	107

IV-4 Propriétés spectroscopiques de résonance magnétique nucléaire	108
---	-----

NOTES COMPLÉMENTAIRES

NC2-1 Influence de la température sur la pression de vapeur d'une substance pure	109
NC2-2 Molécules polaires	111
NC2-3 Liaisons et interactions entre les molécules	112
NC2-4 Les pesticides fumigants	115
NC2-5 Quelques rappels de thermodynamique	116
NC2-6 Solubilité dans l'eau des sulfonyles	121
NC2-7 Calcul de K_H avec différentes unités	122
NC2-8 Constantes d'acidité et de basicité	123

Chapitre 3 Analyse des pesticides

I LES OPÉRATIONS DE TERRAIN

II TRANSPORT ET STOCKAGE DES ÉCHANTILLONS

III EXTRACTION DES PESTICIDES

III-1 Extraction à partir de milieux liquides aqueux	128
III-11 Utilisation de solvants organiques	129
III-12 Utilisation de matériaux adsorbants	130
III-121 Méthode utilisant l'extraction par une phase solide adsorbante (SPE)	130
III-122 Micro-extraction par une phase solide	132
III-2 Extraction des pesticides contenus dans des échantillons solides	132
III-21 Extraction à température et pression ambiantes	133
III-22 Extraction à pression ambiante et température élevée	133
III-221 Extraction à reflux (Soxhlet)	133
III-222 Extraction par micro-ondes	133
III-23 Extraction à pression et température élevées	133
III-24 Extraction avec un fluide dans un état supercritique	133
III-3 Comparaison des méthodes d'extraction des pesticides	134
III-4 Aspects particuliers de l'extraction des pesticides contenus dans les sols et les sédiments	135
III-41 Relation entre les propriétés des sols et l'extraction	135
III-42 Signification des quantités extraites	136
III-421 Aspects analytiques	136
III-422 Aspects phénoménologiques	136

IV DOSAGE DES PESTICIDES	137
IV-1 Méthodes chimiques	137
IV-11 Méthodes immunoenzymatiques	138
IV-12 Spectrométrie de masse	138
IV-2 Méthodes spectroscopiques	139
IV-21 Spectroscopie Ultraviolet-visible	139
IV-22 Spectroscopie infrarouge	140
IV-23 Résonance magnétique nucléaire	140
IV-3 Méthodes chromatographiques	141
IV-31 Chromatographie en phase gazeuse (CPG)	142
IV-32 Chromatographie des substances dissoutes	144
IV-321 Chromatographie sur couches minces	144
IV-322 Chromatographie en phase liquide à haute pression (HPLC)	144
IV-4 Méthodes utilisant des isotopes radioactifs	145
IV-5 Méthodes biologiques	146
IV-6 Comparaison des méthodes d'analyse	146
NOTES COMPLÉMENTAIRES	
NC3-1 Appareil de Soxhlet	148
NC3-2 Etat supercritique d'un fluide	149
NC3-3 Principe de la méthode ELISA	150
NC3-4 Spectrométrie d'absorption des rayonnements visibles et ultraviolets	151
NC3-5 Principe de quelques dispositifs de chromatographie	152
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	154

Deuxième partie : À quels phénomènes les pesticides sont-ils soumis dans le sol ?

PHENOMENOLOGIE DES PESTICIDES DANS LE SOL ...159

Chapitre 4 –Rétention des pesticides dans le sol ...161

I NATURE DES PHÉNOMÈNES 161 |

II ADSORPTION DES PESTICIDES 163 |

II-1 Définitions 163 |

II-2 Interactions entre les molécules adsorbées et les surfaces adsorbantes 164 |

II-21 Les surfaces adsorbantes	164
II-211 Les constituants minéraux	165
II-212 Les constituants organiques	165
II-22 Les mécanismes moléculaires de l'adsorption	168
II-221 Les interactions entre les surfaces adsorbantes et les molécules de pesticides	168
II-222 Aspect énergétique de l'adsorption	169
II-223 Rôle de l'eau	171
II-224 Correspondances entre les interactions et les mécanismes moléculaires	175
II-3 Méthodes d'étude de l'adsorption	177
II-31 Détermination des quantités adsorbées	177
II-311 Matériaux adsorbants non structurés	177
II-3111 Principes généraux	177
II-3112 Méthodes expérimentales	180
II-312 Matériaux adsorbants structurés	181
II-32 Etude des molécules adsorbées	182
II-321 Méthodes permettant d'obtenir des informations sur les interactions avec la phase solide	182
II-322 Aptitude des molécules adsorbées à être mobilisées	183
II-4 Caractéristiques de l'adsorption à l'interface liquide/solide	184
II-41 Vitesses de sorption, cinétiques de sorption	184
II-411 Considérations générales sur la vitesse de sorption	184
II-412 Limitation des vitesses de sorption en milieux hétérogènes	184
II-413 Conséquence des vitesses de sorption	187
II-42 Caractéristiques d'équilibre	190
II-421 Isothermes d'adsorption	190
II-422 Formulation de Langmuir	191
II-4221 Formulation classique	191
II-4222-Signification des paramètres de l'équation de Langmuir	193
II-4223 Formulation de Langmuir généralisée	195
II-423 Formulation de Freundlich	196
II-4231 Expression du coefficient K_F	197
II-4232 Détermination des valeurs des coefficient K_F et n_F	197
II-4233 Signification des valeurs des coefficients K_F et n_F	198
II-424 Formulation linéaire des isothermes d'adsorption	199
II-4241 Quelle signification donner à une formulation linéaire?	199
II-4242 Approximation linéaire de l'équation de Langmuir	201
II-4243 Approximation linéaire de l'équation de Freundlich	201
II-4244 Le coefficient de distribution K_d	202
II-5 Facteurs de l'adsorption	203
II-51 Propriétés des molécules	204
II-52 Influence des propriétés des surfaces adsorbantes	207

II-521 Adsorption et types de sols	207
II-522 Caractéristiques de l'adsorption et composition des sols	208
II-5221 Isothermes d'adsorption	208
II-5222 Coefficients de distribution K_d et K_{oc}	209
II-5223 Classement des pesticides selon leur capacité à être adsorbés	212
II-53 Facteurs expérimentaux	214
III PHÉNOMÈNE DE STABILISATION	217
III-1 Historique et mise en évidence	217
III-2 Hypothèses et mécanismes de formation	219
III-3 Méthodes d'étude	221
III-4 Facteurs ayant une influence sur la formation des résidus non extractibles	223
IV MOBILISATION DES PESTICIDES	227
IV-1 Mobilisation dans une phase liquide aqueuse	228
IV-11 Mobilisation consécutive à des modifications de composition de la phase liquide; le phénomène de désorption	228
IV-111 Définition et nature du phénomène	228
IV-112 Isothermes de désorption	230
IV-1121 Définition et approche expérimentale	230
IV-1122 Les causes possibles de l'hystérésis	232
IV-1123 Modélisation des isothermes de désorption	232
IV-12 Mobilisation consécutive à des modifications de la phase solide	233
IV-2 Mobilisation dans la phase gazeuse du sol	233
NOTES COMPLÉMENTAIRES	
NC4-1 Les phases du sol	234
NC4-2 Composition granulométrique et texture des sols	236
NC4-3 Quelques propriétés des minéraux des sols	238
NC4-4 Quelques propriétés de la matière organique des sols	240
NC4-5 Adsorption des pesticides ionisés	242
NC4-6 Méthodes de stérilisation des matériaux terreux	245
NC4-7 Utilisation de la centrifugation pour l'étude de l'adsorption des pesticides	247
NC4-8 Quelques informations sur la spectroscopie d'absorption infrarouge	248
NC4-9 Quelques informations sur la modélisation des cinétiques de sorption	250
NC4-10 Les valeurs numériques du coefficient K_F de l'équation de Freundlich	252
NC4-11 Relations entre le coefficient normalisé d'adsorption et des grandeurs moléculaires de partage	253

Chapitre 5 -Dégradation des pesticides	255
I DÉGRADATION ABIOTIQUE	256
I-1 Les principales transformations chimiques abiotiques en solution	257
I-11 L'hydrolyse	257
I-111 Mécanismes moléculaires	257
I-1111 Substitution nucléophile sur un atome : exemple des composés organophosphorés	257
I-1112 Substitution nucléophile sur un groupe acyle	258
I-112 Vitesse des réactions d'hydrolyse	259
I-1121 Influence de la composition ionique du milieu	259
I-1122 Catalyse de l'hydrolyse par des cations métalliques	261
I-1123 Catalyse de l'hydrolyse par des composés organiques	262
I-1124 Influence de la température sur la vitesse d'hydrolyse	262
I-12 Réactions d'oxydation et de réduction	262
I-13 Réactions avec des composés organiques	263
I-2 Les transformations chimiques en phase adsorbée sur les minéraux	264
I-21 Caractéristiques des minéraux et transformations chimiques en phase adsorbée	264
I-211 Les sites d'adsorption où les réactions chimiques sont possibles	264
I-212 Les mécanismes réactionnels	265
I-22 Principaux facteurs agissant sur la vitesse des réactions chimiques en phase adsorbée	266
I-23 Exemples de transformations chimiques en phase adsorbée	268
I-3 Les transformations photochimiques	268
I-31 Réactions photochimiques	268
I-311 Absorption de la lumière	268
I-3111 Physique de l'absorption de la lumière	268
I-3112 Les groupes chromophores	270
I-312 Les types de réactions photochimiques	271
I-32 Photodégradation des pesticides	272
I-321 Transformations photochimiques des pesticides dissous	272
I-322 Transformations photochimiques des pesticides adsorbés	273
II DÉGRADATION BIOTIQUE	274
II-1 Le processus de dégradation biotique	274
II-2 Mécanismes microbiens de la dégradation biotique	276
II-21 Les trois mécanismes microbiens de la dégradation	277
II-211 Le métabolisme direct	277
II-2111 Définition	277
II-2112 Caractéristiques générales	278

II-212	Le cométabolisme	279
II-213	La conjugaison et la condensation	280
II-22	Les principales réactions mises en jeu dans la dégradation microbienne des pesticides	280
II-221	Réactions d'hydrolyse	281
II-222	Réactions d'oxydation	281
II-223	Réactions de réduction	283
II-23	Les enzymes impliquées dans la dégradation des pesticides	283
III	CINÉTIQUES DE DÉGRADATION	284
III-1	Etude expérimentale des cinétiques de dégradation	284
III-11	Conditions expérimentales	285
III-12	Différentes cinétiques expérimentales de dégradation	287
III-2	Approche générale du déterminisme des vitesses de dégradation dans le sol	291
III-3	Cinétique de la dégradation microbienne	294
III-31	Cinétique de croissance microbienne	294
III-311	Caractéristiques générales	294
III-312	Facteurs de la croissance des micro-organismes dégradants	294
III-3121	Facteurs physiques	295
III-3122	Facteurs chimiques	295
III-3123	Facteurs biologiques	296
III-32	Cinétiques enzymatiques	296
III-321	Description générale	296
III-322	Facteurs ayant une influence sur les réactions enzymatiques	297
III-3221	La température	297
III-3222	Facteurs génétiques	298
III-33	Cinétiques globales	299
IV	DONNÉES GÉNÉRALES SUR LA DÉGRADATION DES PESTICIDES	300
IV-1	Valeurs des vitesses de dégradation	300
IV-11	Cinétiques du premier ordre	300
IV-12	Domaines de valeurs des vitesses de dégradation	302
IV-121	Hydrolyse	302
IV-122	Photodégradation	304
IV-123	Disparition dans les conditions du laboratoire	305
IV-1231	Ordres de grandeur des durées de demi-vie de dégradation au laboratoire	306
IV-1232	Facteurs expérimentaux influençant la vitesse de dégradation au laboratoire	308
IV-2	Caractéristiques générales de la dégradation des pesticides dans le sol	311

NOTES COMPLÉMENTAIRES

NC5-1 Exemples de réactions d'hydrolyse	315
NC5-2 Exemples de mécanismes d'action d'un cation métallique sur l'hydrolyse	318
NC5-3 Hydrolyse des molécules adsorbées	319
NC5-4 Quelques données sur les transformations photochimiques des pesticides	321
NC5-5 Quelques caractéristiques de la microflore du sol	323
NC5-6 Aspects énergétiques des réactions enzymatiques	326
NC5-7 Etude expérimentale de la dégradation d'un pesticide au laboratoire	328
NC5-8 Exemples de voies métaboliques	331

Chapitre 6- Phénomènes de transport 333**I NATURE DES PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT** 333**II TRANSPORT DES PESTICIDES PAR DIFFUSION MOLÉCULAIRE** ... 335

II-1 Quelques données générales sur la diffusion moléculaire	335
II-11 Nature du transport par diffusion moléculaire	335
II-12 Description mathématique de la diffusion moléculaire	336
II-121 Expression de la loi de Fick	336
II-122 Equation de diffusion	337
II-13 Aspect énergétique de la diffusion moléculaire; influence de la température	338
II-14 Valeurs du coefficient de diffusion moléculaire dans les milieux homogènes	338
II-2 Diffusion des pesticides dans les milieux poreux en l'absence de rétention et de dégradation	340
II-21 Diffusion dans les milieux poreux saturés en eau	340
II-22 Diffusion dans les milieux poreux non saturés en eau	342
II-221 Diffusion des pesticides non volatils	342
II-222 Diffusion des pesticides volatils	343

III TRANSPORT DES PESTICIDES PAR CONVECTION 345

III-1 L'écoulement de l'eau dans le sol	345
III-11 Lois de l'écoulement	345
III-12 Influence de l'état de saturation en eau du sol; les régimes hydrodynamiques	346
III-13 La conductivité hydraulique des sols	348
III-131 Conductivité hydraulique des sols saturés en eau	348
III-132 Conductivité hydraulique des sols non saturés en eau	348

III-2 Transport des pesticides dissous par convection/dispersion	351
III-21 Nature du processus de convection/dispersion	351
III-22 Le coefficient de dispersion hydrodynamique	353
III-23 Localisation des phénomènes de transport des pesticides dissous	353
III-24 Transports préférentiels des pesticides	355
III-3 Transport particulaire des pesticides	357

NOTES COMPLÉMENTAIRES

NC6-1 Exemples de solutions de l'équation de diffusion	359
NC6-2 Estimation des valeurs des coefficients de diffusion moléculaire dans l'air et dans l'eau	361
NC6-3 Quelques informations sur le potentiel hydrique	363
NC6-4 Mise en évidence expérimentale de la dispersion hydrodynamique	368

Chapitre 7- Couplages entre les phénomènes

I DESCRIPTION EXPÉRIMENTALE DES COUPLAGES

I-1 Couplages agissant sur la dégradation	373
I-11 Couplages agissant sur la dégradation abiotique	373
I-111 Influence de la rétention	373
I-112 Influence des phénomènes de transport	374
I-12 Couplages agissant sur la dégradation biotique	374
I-121 Couplages avec la rétention	375
I-122 Couplages avec le transport	379
I-2 Couplages agissant sur la rétention	381
I-21 Influence de la dégradation	381
I-22 Influence du transport	381
I-3 Couplages agissant sur le transport	381
I-31 Influence de la dégradation sur le transport	382
I-32 Influence de la rétention sur le transport	382

II MODÉLISATION DES COUPLAGES

II-1 Modèles simples	385
II-11 Modèles décrivant le couplage entre l'adsorption et la diffusion moléculaire en phase liquide	385
II-12 Modèles décrivant le couplage entre l'adsorption et la dégradation	386
II-2 Modèles complexes de couplage	387
II-21 Que sont ces modèles?	387

II-22 Les différents modèles de couplage	388
II-221 Caractéristiques générales	388
II-222 Les catégories de modèles	389

NOTES COMPLÉMENTAIRES

NC7-1 Interactions entre les micro-organismes et les surfaces des constituants solides du sol	392
NC7-2 Modèle de transport avec deux phases liquides et deux populations de sites avec une adsorption instantanée	393
NC7-3 Exemple d'un modèle de couplage entre la rétention et la dégradation	397

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	399
--	-----

Troisième partie

Que deviennent les pesticides dans le sol et quelles en sont les conséquences ?

APPROCHE GLOBALE DU DEVENIR DES PESTICIDES DANS LE SOL	415
---	-----

Chapitre 8 - Transferts et dissipation des pesticides dans le sol	419
--	-----

I MÉTHODES D'ÉTUDE EXPÉRIMENTALES	419
--	-----

I-1 Les principaux dispositifs expérimentaux	419
I-11 Dispositifs locaux	421
I-111 Les lysimètres	421
I-112 Les tunnels de ventilation	422
I-113 Les placettes	423
I-12 Les parcelles	425
I-13 Bassins versants	426
I-2 Les méthodes de prélèvement	426
I-21 Prélèvements de matériaux terreux	427
I-22 Prélèvements dans les milieux aqueux	428
I-221 Prélèvements de la solution du sol	428

I-222 Prélèvements dans les aquifères	431
I-223 Prélèvements dans les eaux de surface	431
I-23 Prélèvements dans les milieux gazeux	431
II ASPECTS QUANTITATIFS DES TRANSFERTS	432
II-1 Les transferts de pesticides à partir du sol	432
II-2 Transferts en phase aqueuse	432
II-21 Le cycle hydrologique	432
II-22 Transferts vers les eaux superficielles	434
II-221 Les flux de pesticides vers les eaux superficielles	434
II-222 Les processus de transfert des pesticides vers les eaux superficielles	435
II-223 Les facteurs influençant les transferts des pesticides vers les eaux superficielles	437
II-23 Transferts vers les eaux souterraines	439
II-231 Les flux	439
II-232 Les processus de transfert vers les eaux souterraines	439
II-2321 Le transport à l'état dissous, la lixiviation	439
II-2322 Le transport à l'état associé avec des macromolécules organiques	440
II-3 Transferts en phase gazeuse vers l'atmosphère, la volatilisation	441
II-31 Le processus de volatilisation	441
II-32 Ordres de grandeur des flux de volatilisation	442
III DISSIPATION DES PESTICIDES DANS LE SOL	442
III-1 Nature du processus	442
III-2 Vitesse de dissipation des pesticides dans le sol	446
III-21 Cinétiques de dissipation	446
III-22 Les durées de demi-vie de dissipation des pesticides dans le sol	448
III-221 Valeurs observées	448
III-222 Analyse critique des valeurs observées	450
III-23 Les facteurs ayant une influence sur la durée de demi-vie de dissipation	451
III-231 Facteurs physiques et physico-chimiques	451
III-2311 Facteurs physiques	451
III-2312 Facteurs physico-chimiques	453
III-232 Facteurs microbiens	453
III-2321 La spécificité des micro-organismes	453
III-2322 L'adaptation des micro-organismes à la dégradation	453
III-2323 Répartition des micro-organismes en profondeur dans le sol	455
III-3 Conséquences de la dissipation; la persistance des pesticides dans le sol	455

IV TRANSFERTS VERS LES ORGANISMES VIVANTS – BIODISPONIBILITÉ DES PESTICIDES DANS LE SOL	458
IV-1 Déterminisme et définition de la biodisponibilité	458
IV-2 Biodisponibilité et devenir des pesticides dans le sol	461
IV-21 Passage des pesticides dans une phase fluide du sol	461
IV-22 Rétention et biodisponibilité des pesticides	461
IV-221 Adsorption et biodisponibilité	461
IV-222 Stabilisation et biodisponibilité	464
IV-23 Biodisponibilité et transport	465
IV-24 Dégradation et quantité biodisponible	465
IV-3 Biodisponibilité et modalités des traitements du sol	465
IV-31 La formulation	466
IV-32 Placement des pesticides dans le sol	466
IV-321 Incorporation dans le sol	466
IV-322 Le conditionnement des semences	468
IV-4 Estimation des quantités biodisponibles	469
IV-41 Estimation par extraction	469
IV-42 Estimation à l'aide de tests biologiques	470

NOTES COMPLÉMENTAIRES

NC8-1 Etude expérimentale de la volatilisation en plein champ ...	471
NC8-2 Infiltrabilité du sol	473
NC8-3 Quelques informations sur l'érosion hydrique	474
NC8-4 Les différents types de sélectivité des herbicides	478
NC8-5 Approche de la relation entre la biodisponibilité et l'adsorption	479

Chapitre 9 - Le devenir des pesticides dans le sol et les risques de pollution de l'environnement 481

I LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX DES PESTICIDES	482
I-1 Notions générales et définitions	482
I-11 L'évaluation environnementale	482
I-12 Les concepts de danger et de risque	483
I-121 Définitions	483
I-122 Les risques environnementaux	485
I-13 Notions d'exposition et d'impacts	485

I-2 Nature des risques environnementaux liés aux pesticides	486
I-21 Pollution des milieux naturels	486
I-211 Les apports de pesticides dans les milieux naturels	486
I-212 Les types de pollution par les pesticides	487
I-22 Effets des pesticides sur les organismes vivants	487
I-221 Processus mis en jeu	488
I-222 Différents types d'effets des pesticides	488
I-223 Exemples d'effets des pesticides sur les organismes vivants	489
I-3 Analyse des risques environnementaux	491
I-31 Le management des risques environnementaux	491
I-32 Etape n° 1, l'identification des dangers	493
I-33 Etape n° 2, l'analyse de l'exposition	493
I-34 Etape n° 3, l'analyse des effets	496
I-341 Nature de l'information recherchée	496
I-3411 Les organismes vivants	496
I-3412 Les milieux	498
I-342 Méthodes utilisées pour les organismes vivants	498
I-35 Etape n° 4, caractérisation des risques	499
I-351 Expression des risques	499
I-3511 Expression des risques environnementaux pour les milieux	500
I-3512 Expression des risques environnementaux pour les organismes vivants	500
I-352 Les incertitudes de l'analyse des risques	501
II ESTIMATION DES RISQUES DE POLLUTION PAR LES PESTICIDES	502
II-1 Démarches de classement	502
II-11 Classements des pesticides	503
II-111 Classements basés sur un paramètre	503
II-112 Classements basés sur plusieurs paramètres	505
II-1121 Démarches empiriques	506
II-1122 Modélisation simplifiée des transferts	509
II-12 Classements des milieux	510
II-2 Démarches destinées à calculer des concentrations et des flux de pesticides	510
II-21 Caractéristiques générales des modèles	511
II-211 Différents types de modèles	511
II-212 Structure des modèles mécanistes	512
II-2121 Les paramètres d'entrée	513
II-2122 Les phénomènes modélisés	516
II-2123 Les sorties des modèles	518
II-22 Mise en œuvre des modèles	519
II-221 La modélisation du devenir des pesticides dans le sol et les variabilités spatiale et temporelle des milieux	519
II-222 La sensibilité des modèles	521
II-223 Les performances des modèles	523

III LA GESTION DES RISQUES DE POLLUTION PAR LES PESTICIDES	.525
III-1 Evaluation et classement des risques	.525
III-2 L'analyse coût/bénéfice	.527
III-3 Pratiques destinées à réduire les risques	.528
III-31 <i>Pratiques relatives à la mise en œuvre des pesticides</i>	.528
III-311 Transport, stockage et manipulation des produits phytosanitaires	528
III-312 Les modalités de traitement	.529
III-32 <i>Les aménagements de l'espace</i>	.530
III-33 <i>Les diagnostics agro-environnementaux</i>	.531
III-4 Aspects socio-économiques	.531
III-41 <i>La réglementation</i>	.531
III-42 <i>La surveillance</i>	.533
III-43 <i>Les actions de recherche et de formation</i>	.533
 NOTES COMPLÉMENTAIRES	
NC9-1 Facteur de bioconcentration	.535
NC9-2 Estimation des prélèvements par l'homme et les autres organismes vivants	.536
NC9-3 Quelques informations sur les tests biologiques	.538
NC9-4 Relation entre la fraction de pesticide en solution et la valeur du coefficient linéaire d'adsorption	.539
NC9-5 Calcul du facteur d'atténuation relatif aux transferts vers les eaux souterraines	.541
NC9-6 Modèle BAM « Behaviour Assessment Model »	.543
NC9-7 Exemple d'un indicateur parcellaire de contamination des eaux superficielles par les produits phytopharmaceutiques	.547
NC9-8 Description sommaire de quelques modèles numériques	.549
NC9-9 Relations entre le coefficient d'adsorption et des grandeurs moléculaires	.553
NC9-10 Les modèles de transfert vers l'atmosphère par volatilisation	.555
NC9-11 Comparaison entre des simulations et des observations	.558
NC9-12 Démarche de l'évaluation des risques environnementaux relatifs aux substances chimiques polluantes	.559
NC9-13 Quelques informations sur les formulations des produits phytosanitaires	.560
NC9-14 Dispositifs enherbés	.562
 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 .563

FICHES RESUMES

FICHE 1 – LES PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DES PESTICIDES	577
FICHE 2 – LA RÉTENTION DES PESTICIDES DANS LE SOL	580
FICHE 3 – LA DÉGRADATION DES PESTICIDES DANS LE SOL	582
FICHE 4 – LES TRANSFERTS DE PESTICIDES DANS LE SOL, L'AIR ET LES EAUX	584
FICHE 5 – LA DISSIPATION DES PESTICIDES DANS LE SOL	586
FICHE 6 – LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX DES PESTICIDES	588
FICHE 7 – ESTIMATION DES RISQUES DE POLLUTION PAR LES PESTICIDES ...	590
FICHE 8 – PRATIQUES DESTINÉES À RÉDUIRE LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX DES PESTICIDES	593

ANNEXES

ANNEXE 1 STRUCTURE CHIMIQUE ET PRINCIPALES PROPRIÉTÉS DE QUELQUES PESTICIDES	597
ANNEXE 2 SIGLES ET ADRESSES ÉLECTRONIQUES DES PRINCIPAUX ORGANISMES CONCERNÉS PAR LES PESTICIDES	620
ANNEXE 3 QUELQUES INFORMATIONS RELATIVES À LA DIRECTIVE EUROPÉENNE 91/414 SUR L'ÉVALUATION DU RISQUE ENVIRONNEMENTAL DES PRODUITS PHYTOPHARMACEUTIQUES	622
ANNEXE 4 ABRÉVIATIONS UTILISÉES (EXTRAIT DU GLOSSAIRE FRANÇAIS- ANGLAIS ÉTABLI PAR LE GROUPE DE TRAVAIL « TERMINOLOGIE » DE LA COMMISSION DES ESSAIS BIOLOGIQUES ET LA SSM)	626
ANNEXE 5 PRINCIPALES CONSTANTES PHYSIQUES UTILISÉES	628
ANNEXE 6 SYMBOLES ET UNITÉS LES PLUS FRÉQUENTES DES PRINCIPALES GRANDEURS CITÉES	629

INDEX

INDEX DES PRINCIPALES FAMILLES CHIMIQUES CITÉES	631
INDEX DES PRINCIPALES SUBSTANCES ACTIVES CITÉES	633
INDEX ALPHABÉTIQUE	637

Les pesticides dans le sol

Conséquences agronomiques et environnementales

Cet ouvrage sur le devenir des pesticides dans le sol est un recueil des données les plus importantes, accompagnées de leur analyse critique, destinée à en souligner l'intérêt et les limites. Il comprend un ensemble de neuf chapitres conduisant le lecteur, des connaissances de base, à leurs applications agronomiques et environnementales. La pollution des milieux naturels par les pesticides fait l'objet de plusieurs paragraphes pour en analyser le déterminisme, exposer les démarches de prévision des risques et indiquer les principaux moyens de les réduire. Ces chapitres sont groupés en trois parties destinées à répondre aux questions suivantes :

1. Que sont les pesticides,
2. A quels phénomènes sont-ils soumis dans le sol,
3. Que deviennent-ils dans ce milieu et quelles en sont les conséquences.

L'attention du lecteur est attirée sur la progression de l'exposé des connaissances. La troisième partie ne peut être utilement abordée qu'après la lecture préalable des deux premières. Chaque chapitre contient les informations nécessaires à la description et à la compréhension des phénomènes. A la fin de chacun d'eux, des notes complètent l'information sur des points particuliers. Des fiches résumant les principales connaissances exposées et renvoyant aux chapitres correspondants, sont placées à la fin de l'ouvrage. Les annexes contiennent des données sur les principaux produits cités et une liste d'organismes où, des informations scientifiques, techniques et réglementaires, peuvent être trouvées. Dans le contexte actuel de sensibilisation à la maîtrise des pollutions, l'ouvrage est une contribution scientifique à la diffusion des connaissances sur le sujet. Il intéressera un large panel de techniciens, de chercheurs et d'enseignants dans tous les métiers et les disciplines concernés par les pesticides et les milieux naturels.

ISBN 2-85557-119-7



9 782855 1571195

Editions
France Agricole