

Amaury **de Guardia**
Coordonnateur



Compostage et Composts

Avancées scientifiques et techniques



Lavoisier
TEC & DOC

Amaury **de Guardia**
Coordonnateur



Compostage et Composts

Avancées scientifiques et techniques

L*avoisier*
TEC & DOC

editions.lavoisier.fr

Dans la même collection

Les milieux estuariens et littoraux – une approche scientifique pour les préserver et les exploiter durablement

J.-P. Ducrottoy, 2018

Dictionnaire – Collectivités territoriales et développement durable

J.-L. Pissaloux, 2017

Biomarqueurs en écotoxicologie aquatique

J.-C. Amiard, C. Amiard-Triquet Claude, 2e édition, 2017

Les risques chimiques environnementaux

J.-C. Amiard, 2016

Naturalité des eaux et des forêts

D. Vallauri, C. Chauvin, J.-J. Brun, M. Fuhr, N. Sardat, J. A., R. Eynard-Machet, M. Rossi et J.-P. De Palma. Avec le concours de WWF, IRSTEA et REFORA.

Déchets et économie circulaire

M-A Marcoux, F. Olivier, F. Théry, Association RECORD, 2016

Écologie et aménagement des eaux marines – le potentiel des océans et des mers

G. Barnabé, 2016

Droit de l'environnement – Comprendre et appliquer la réglementation

Ph. Malingrey, 2016

Changement climatique et cycle de l'eau – Impact, adaptation, législation et avancées scientifiques

I. La Jeunesse, Ph. Quevauvillier, 2015

La restauration écologique des estuaires

J.P. Ducrottoy, 2010

Directeur des éditions : Jean-Marc Bocabeille
Édition : Fabienne Roulleaux, Concept Editions
Couverture : Nord-Compo, Villeneuve d'Ascq
Illustrations de couverture : A. de Guardia
Composition : Nord-Compo, Villeneuve d'Ascq

Pour plus d'informations sur nos publications :



newsletters.lavoisier.fr/9782743023591

© 2018, Lavoisier, Paris
ISBN : 978-2-7430-2359-1

LISTE DES AUTEURS

Aemig Quentin

INRA, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE), Narbonne, France

Akkal-Corfini Nouraya

UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation), Rennes, France

Aubert Claude

ITAVI, Zoopôle Beaucemaine, Ploufragan, France

Bayard Rémy

Université de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP, Villeurbanne, France

Blanc Cécilia

SIEEEN, Nevers, France

Blazy Vincent

Irstea, UR OPAALE, Rennes, France
Opting Environment, Vaiges, France

Boucherie Guillaume

Smictom des Pays de Vilaine, Maison communautaire, Pipriac, France

Bournigal Jean-Marc

AGPB, Paris, France

Capdeville Jacques

Idele, Monvoisin, Le Rheu, France

Capowiez Yvan

UMR 1114 EMMAH (Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes), INRA – UAPV, Avignon, France

Chollot Alain

INRS, Département Ingénierie de Procédés, Vandoeuvre, France

Cluzeau Daniel

Université de Rennes 1, CNRS, OSUR, UMR 6553 EcoBio, Station Biologique de Paimpont, Paimpont, France

Colin Thomas

Compostplus, Route de Canet, Aspiran, France

Corbel Sylvain

UMR INRA-Agro ParisTech 1402 ECOSYS (Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des agrosystèmes), Université Paris-Saclay, Versailles, France

Cortet Jérôme

UMR 5175, Centre d'Écologie Fonctionnelle et évolutive (CEFE), Montpellier

Couvert Annabelle

ENSCR (École Nationale Supérieure de Chimie De Rennes), Institut des Sciences Chimiques de Rennes (UMR CNRS 6226), RENNES, France

Dabert Patrick

Irstea, UR OPAALE, Rennes, France

Decoopman Bertrand

Chambre d'agriculture de Bretagne, Rennes, France

de Guardia Amaury

Irstea, UR OPAALE, Rennes, France

Demange Valérie

INRS, Département Épidémiologie en Entreprise, Vandoeuvre, France

Deschamps Marjolaine

UMR INRA-Agro ParisTech 1402 ECOSYS (Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des agrosystèmes), Université Paris-Saclay, Thiverval-Grignon, France

Dirrenberger Patricia

INRS, Département Ingénierie des Procédés, Vandoeuvre, France

Druilhe Céline

Irstea, UR OPAALE, Rennes, France

Duquenne Philippe

INRS, Département Métrologie des Polluants, Vandoeuvre, France

Farinet Jean-Luc

CIRAD, UPR Recyclage et risque, Montpellier, France

Frederich Carine

Syndicat Mixte du Secteur 4, Cernay, France

Fuchs Jacques G.

Département de protection des plantes et biodiversité, Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL, Frick, Suisse

Gourdon Rémy

Université de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP, Villeurbanne, France

Hassouna Mélynda

UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation), Rennes, France

Hedde Mickael

UPR 251 PESSAC, INRA, Versailles, France

Houot Sabine

UMR INRA-Agro ParisTech 1402 ECOSYS (Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des agrosystèmes), Université Paris-Saclay, Thiverval-Grignon, France

Kempf Isabelle

Anses, Laboratoire de Ploufragan, Unité Mycoplasmodologie Bactériologie et Antibiorésistance, Zoopole les croix, Ploufragan, France

Le Bozec André

Irstea, UR OPAALE, Rennes, France

Le Bris Bertrand

Chambres d'Agricultures de Bretagne, Station de Guernevez, Saint-Goazec

Leclerc Blaise

Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB), Cucuron, France

Lemée Laurent

Université de Poitiers, IC2MP - UMR CNRS 7285, SFA, Poitiers, France

Levasseur Pascal

Ifip – Institut du Porc, Le Rheu, France

Lorinquer Elise

Idele, Monvoisin, Le Rheu, France

Martin-Laurent Fabrice

UMR 1347 AGROECOLOGIE, INRA, Bâtiment Dommergues, Dijon

Menasseri Safya

UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation), Rennes, France

Mollier Alain

UMR 1391 ISPA (Interactions Sol-Plante-Atmosphère), INRA, Villenave D'Ornon, France

Morel Christian

UMR 1391 ISPA (Interactions Sol-Plante-Atmosphère), INRA, Villenave D'Ornon, France

Mougin Christian

UMR INRA-Agro ParisTech 1402 ECOSYS (Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des agrosystèmes), Université Paris-Saclay, Versailles, France

Oudart Didier

UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation), Rennes, France

Paillat Jean-Marie

CIRAD, UPR Recyclage et risque, Montpellier, France

Parnaudeau Virginie

UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation), Rennes, France

Patureau Dominique

INRA, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE), Narbonne, France

Pelosi Céline

UMR INRA-Agro ParisTech 1402 ECOSYS (Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des agrosystèmes), Versailles, France

Piquemal Renaud

Syndicat Centre Hérault, Route de Canet, Aspiran, France

Poirot Pascal

INRS, Département Ingénierie des Procédés, Vandoeuvre, France

Ponchant Paul

ITAVI, Ploufragan, France

Pourcher Anne-Marie

Irstea, UR OPAALE, Rennes, France

Quintard Michel

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, Toulouse, France

Robin Paul

UMR INRA/Agrocampus 1069 SAS (Sol Agro et hydrosystème Spatialisation),
Rennes, France

Silvente Eric

INRS, Département Ingénierie des Procédés, Vandoeuvre, France

Simon Xavier

INRS, Département Métrologie des Polluants, Vandoeuvre, France

Toudic Aurore

Chambres d'agriculture de Bretagne, Rennes, France

Trémier Anne

Irstea, UR OPAALE, Rennes, France

Vieublé-Gonod Laure

UMR INRA-Agro ParisTech 1402 ECOSYS (Écologie Fonctionnelle et Écotoxicologie des agrosystèmes), Thiverval Grignon, France

Villenave Cécile

Elisol Environnement, Congénies, France

Wéry Nathalie

INRA, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE), Narbonne, France

Wolbert Dominique

ENSCR (École Nationale Supérieure de Chimie De Rennes), Institut des Sciences Chimiques de Rennes (UMR CNRS 6226), RENNES, France

Zeng Yang

School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan, China

SOMMAIRE

Liste des auteurs	III
Préface	XV
Remerciements	XVII
Introduction	1

Processus, effets et déterminants des traitements par compostage

CHAPITRE 1

Aspects biochimiques et microbiologiques du compostage

Patrick Dabert, Anne-Marie Pourcher	7
1. Notions de base de métabolisme et de thermodynamique	9
1.1. Notion d'énergie et de source d'énergie	10
1.2. Énergie libre et potentiel redox	11
1.3. Importance de l'oxygène et des accepteurs d'électrons	13
1.4. Sources de carbone et de substances nutritives	14
2. Voies métaboliques impliquées en phase active de compostage	15
2.1. Entrée des molécules dans les cellules	15
2.2. Voies de dégradation en présence d'oxygène	16
2.3. Voies de dégradation en absence d'oxygène	17
3. Communautés microbiennes des composts	21
3.1. Bref historique des techniques d'identification des micro-organismes	21
3.2. Composition et évolution des communautés microbiennes en compostage	23
4. Conclusion	39

CHAPITRE 2

Hydrodynamique et transferts de masse au sein d'un massif de déchets

Michel Quintard, Céline Druilhe, Anne Trémier	43
1. Le milieu poreux en tant que système multi-échelle	44
2. Écoulement monophasique : type d'écoulement, calcul de pertes de charge, porosité, perméabilité	49
3. Transport d'un constituant (traceur, O ₂ et H ₂ O)	55
3.1. Traceur passif : diffusion, dispersion	55
3.2. Transport multiconstituant	64
4. Conclusion	68

CHAPITRE 3

Biodégradation de la matière organique

Amaury de Guardia, Anne Trémier, Céline Druilhe	71
1. Processus de biodégradation et transformations associées de la matière	71
1.1. Matière organique, micro-organismes et oxygène	71
1.2. Fractionnement et oxydation : O ₂ , CO ₂ , MO, CT, COT, DCO et pH	72
1.3. Température et perte d'eau	73
1.4. Défaut d'aérobiose : odeurs et effets dépressifs sur la croissance des végétaux	74

2. Caractérisation et modélisation de la biodégradation aérobie de la matière organique	75
2.1. Approche respirométrique de la biodégradation	75
2.2. Approche par fractionnement analytique associé à la réponse respirométrique ...	84
3. Méthodes de quantification de la biodégradabilité d'un déchet ou d'un produit résiduaire organique	90
3.1. Méthodes de quantification basées sur la mesure de la consommation d'oxygène.	90
3.2. Méthodes de quantification fondées sur l'analyse de la matière organique	91
4. Influences du procédé et des déterminants opérationnels sur la biodégradation ..	94
4.1. Influence des déterminants opérationnels sous aération forcée positive	95
4.2. Aération forcée négative – Aération par retournements	104

CHAPITRE 4

Production et transferts de chaleur

Amaury de Guardia, Anne Trémier, Michel Quintard, Céline Druilhe	111
1. Modélisation du transfert de chaleur dans un milieu poreux réactif tel que le massif en compostage	111
1.1. Conductivité thermique effective	113
1.2. Dispersion thermique	118
2. Modèle de transfert de chaleur à l'échelle 0D sous aération forcée positive	119
3. Déterminants procédés et opérationnels de l'auto-échauffement	128
3.1. Influences de la biodégradabilité de la matière, de la granulométrie du structurant, du ratio structurant/déchet et du taux d'aération sous aération forcée positive	129
3.2. Quelques déterminants procédés et du mode d'aération	131
4. Déterminants du séchage en compostage sous aération forcée positive	133
5. Hétérogénéités thermiques en compostage à l'échelle industrielle	135
5.1. Méthode de mesure de la distribution des champs de température	136
5.2. Distribution et évolution thermiques des coupes transversales	137
5.3. Distribution et évolution thermiques selon les coupes longitudinales	138
5.4. Intérêts de l'étude de la distribution des champs de température dans un casier en compostage	140

CHAPITRE 5

Transformations et transferts de l'azote

Yang Zeng, Amaury de Guardia	145
1. Processus de transformations et de transferts de l'azote	146
1.1. Minéralisation et immobilisation	147
1.2. Stripage de NH_3	149
1.3. Nitrification et voies de production de N_2O lors de la nitrification	151
1.4. Dénitrification et voies de production de N_2O lors de la dénitrification	153
1.5. Occurrence des transformations et transferts de l'azote lors du traitement aérobie d'ordures ménagères résiduelles	154
2. Teneurs en azote des déchets et PRO, des composts et facteurs d'émission en NH_3 et N_2O	158
3. Voies de conservation de l'azote et de limitation des émissions de NH_3 et de N_2O ...	160
3.1. Déterminants de l'immobilisation de l'azote	160
3.2. Voies de limitation des émissions de NH_3	161
3.3. Voies de limitation des émissions de N_2O	163
3.4. Déterminants des émissions de NH_3 versus N_2O lors du compostage d'un digestat d'OMR	165

Intérêts écologiques et agronomiques des composts

CHAPITRE 6

Effets de l'apport de composts sur la biodiversité des sols

Mickaël Hedde, Yvan Capowiez, Jérôme Cortet, Christian Mougin, Céline Pelosi, Laure Vieublé-Gonod, Cécile Villenave, Fabrice Martin-Laurent	175
1. Effets des amendements organiques sur les différents groupes de la faune du sol ...	176
1.1. Micro-organismes	176
1.2. Nématodes	179
1.3. Microarthropodes	182
2. Exemples d'études récentes	183
2.1. Retours à partir d'un essai de longue durée	183
2.2. Effets à long terme sur le fonctionnement biologique des sols	188

CHAPITRE 7

Intérêts agronomiques des composts

Sabine Houot, Laurent Lemée, Safya Menasseri, Virginie Parnaudeau, Christian Morel, Alain Mollier	197
1. Introduction	197
1.1. Les composts sont des matières fertilisantes d'origine résiduaire	197
1.2. Valeur fertilisante versus valeur amendante des MAFOR	198
1.3. Principaux effets attendus de l'apport de composts en agriculture	199
2. Efficacité des composts à augmenter la matière organique des sols	201
2.1. Évidence expérimentale de l'efficacité des composts à augmenter la matière organique des sols	201
2.2. Lien entre potentiel amendant des composts et degré de stabilité de leur matière organique	212
2.3. Déterminants et indicateurs de la stabilité de la matière organique des composts	215
2.4. Effet des composts sur la qualité de la MO des sols	222
2.5. Modélisation de la dynamique de la matière organique en cas d'apport de composts	223
3. Effet des composts sur la disponibilité en nutriments dans les sols	225
3.1. Disponibilité de l'azote des composts	226
3.2. Disponibilité du phosphore des composts	230
3.3. Effet sur les rendements des cultures	233
4. Effet des apports de composts sur les propriétés physiques du sol	234
4.1. Stabilité des agrégats	235
4.2. Porosité du sol et propriétés hydriques	238
4.3. Comportement mécanique des sols	240
5. Synthèse des effets : évaluation multicritères des apports de composts	240

Maîtrise des impacts sanitaires et environnementaux en compostage

Qualité des composts

CHAPITRE 8

Devenir des pathogènes lors du compostage

Nathalie Wéry, Anne-Marie Pourcher, Jacques G. Fuchs	253
1. Prévalence des pathogènes dans les déchets organiques et le compost	254
1.1. Pathogènes pour l'homme et l'animal issus des déchets organiques	254

1.2. Indicateurs de traitement et méthodes de quantification	257
1.3. Problématiques sanitaires associées aux micro-organismes thermophiles et thermotolérants (<i>Legionella</i> , actinomycètes et champignons)	258
1.4. Phytopathogènes	260
2. Hygiénisation lors du compostage	260
2.1. Abattement des espèces pathogènes lors du compostage	260
2.2. Comparaison de l'efficacité d'hygiénisation de différents traitements	264
2.3. Facteurs induisant l'inactivation des espèces pathogènes lors du procédé de compostage	266
2.4. Importance du couple (température ; temps) dans la réglementation	269
2.5. Paramètres opératoires importants pour maîtriser l'hygiénisation	271
2.6. Problématique des recroissances bactériennes	273
3. Conclusion	274

CHAPITRE 9

Impact du compostage sur l'antibiorésistance

Anne-Marie Pourcher, Isabelle Kempf, Nathalie Wéry	279
1. Généralité sur l'antibiorésistance	279
2. Données sur les bactéries résistantes aux antibiotiques (BRA)	280
2.1. Quantification et réduction des BRA	280
2.2. Impact de la présence d'antibiotiques sur le devenir des BRA	283
3. Données sur les gènes de résistance aux antibiotiques (GRA)	285
3.1. Quantification et réduction des GRA	285
3.2. Impact de l'addition d'antibiotiques dans le compost et du traitement antibiotique des animaux sur les teneurs en GRA	288
3.3. Facteurs influençant la dynamique des GRA au cours du compostage	289
3.4. Liens entre la diversité bactérienne et la dynamique des GRA	290
4. Transferts horizontaux de gènes de résistance dans le compost	293
5. Conclusion	294

CHAPITRE 10

Contaminants organiques persistants et émergents : dissipation au cours du compostage et impacts sur les organismes des sols

Quentin Aemig, Sabine Houot, Marjolaine Deschamps, Christian Mougin, Sylvain Corbel, Dominique Patureau	299
1. Présence des contaminants organiques dans les déchets organiques et les composts	300
1.1. Rappel sur les aspects législatifs : polluants réglementés et non réglementés, à l'échelle nationale/internationale, pour l'utilisation des composts	301
1.2. Qualité des intrants de compostage	304
1.3. Qualité des composts issus de déchets municipaux	306
1.4. Qualité des composts agricoles en fonction des intrants	311
1.5. Conclusions	313
2. Dissipation des contaminants au cours du compostage	314
2.1. Formes physiques des contaminants organiques au sein d'un compost	314
2.2. Les échelles d'étude du compostage	316
2.3. Calculs des bilans en contaminants organiques lors du compostage	316
2.4. Capacité de dissipation des procédés de compostage	318
2.5. Mécanismes de dissipation des contaminants organiques lors du compostage	325
2.6. Mise en évidence des mécanismes de dissipation des contaminants organiques	328
2.7. Vers de nouvelles approches pour déterminer les mécanismes de dissipation des contaminants organiques	331
2.8. Conclusions	333

3. Impact écotoxicologique des contaminants chimiques et physiques contenus dans les composts sur les organismes des sols	334
3.1. Les impacts écotoxicologiques dépendent de l'exposition des organismes des sols aux contaminants apportés par les composts	334
3.2. Les impacts écotoxicologiques des contaminants sont potentiellement nombreux mais mis en évidence sur un nombre réduit de cibles biologiques	336
3.3. Quelles sont les difficultés limitant une évaluation pertinente des impacts écotoxicologiques induits par les micropolluants apportés par les composts?	339
3.4. En conclusion, des points de vigilance et des questions de recherche à considérer	341

Émissions gazeuses et odeurs

CHAPITRE 11

Exposition aux polluants chimiques et microbiologiques en unité de compostage et risques pour la santé des travailleurs

Alain Chollot, Valérie Demange, Patricia Dirrenberger, Philippe Duquenne, Pascal Poirot, Eric Silvente, Xavier Simon	359
1. Organisation types des plateformes et tâches professionnelles associées	360
1.1. Description d'une plateforme classique	360
1.2. Tâches professionnelles associées	362
2. Agents chimiques et microbiologiques généralement mesurés et dangers associés	363
2.1. Agents chimiques	363
2.2. Les poussières	365
2.3. Agents biologiques	365
3. Stratégie de mesure de l'exposition professionnelle	367
3.1. Description générale de la stratégie de mesure	368
3.2. Établissement de la stratégie de prélèvement	368
3.3. Réalisation des prélèvements	370
3.4. Analyse des échantillons prélevés	375
3.5. Le traitement et l'interprétation des résultats de concentrations	376
4. Expositions professionnelles mesurées sur les plateformes de compostage	378
4.1. Concentrations ambiantes dans l'air des plateformes de compostage	378
4.2. Exposition des travailleurs sur les plateformes de compostage	384
4.3. Principaux déterminants des expositions	385
4.4. Synthèse sur l'exposition des travailleurs lors du compostage	387
5. Connaissance des effets sur la santé observés chez les travailleurs de ce secteur ..	387
5.1. Symptômes et pathologies	387
5.2. Données para-cliniques	389
5.3. Limites des études épidémiologiques	391
5.4. Synthèse des connaissances actuelles sur les effets sur la santé	391
6. Conclusions et perspectives	391

CHAPITRE 12

Émissions gazeuses et odeurs

Amaury de Guardia, Vincent Blazy	401
1. Sources et types d'émissions en compostage	401
2. Émissions de dioxyde de carbone et de méthane	403
2.1. Enjeux	403
2.2. Facteurs d'émissions	404
2.3. Processus et déterminants	405

3. Émissions d'odeurs	407
3.1. Enjeux	407
3.2. Métrologie des odeurs et des nuisances olfactives	409
3.3. Déterminants des nuisances olfactives en compostage	417
3.4. Processus à l'origine des odeurs en stockage et en phase active	418
3.5. Caractéristiques des émissions d'odeurs en compostage	421
3.6. Voies de prévention des odeurs en phase active	426
3.7. Voies de prévention des odeurs au stockage	428

CHAPITRE 13

Captage, dispersion et traitement des émissions odorantes en compostage

Annabelle Couvert, Dominique Wolbert	435
1. Captage et dispersion des émissions	436
1.1. Méthodes de captage (couverture, ventilation, aspiration)	436
1.2. Dispersion et éolage	439
2. Techniques de traitement et de valorisation des effluents gazeux	442
2.1. Cas des émissions diffuses	442
2.2. Cas des émissions canalisées	444

Procédés appliqués et usages des composts en agriculture

CHAPITRE 14

Le compostage des déchets verts : principes et pratiques

André Le Bozec	469
1. La connaissance du gisement des déchets verts	470
1.1. Les déchets des espaces verts publics	471
1.2. Les déchets de jardins privatifs ou déchets verts des ménages	472
2. Les modes de gestion des déchets verts	473
2.1. Les pratiques de prévention	473
2.2. La valorisation énergétique	474
2.3. La valorisation organique	475
3. Les procédés et conception des plateformes de compostage de déchets verts ...	475
3.1. Les procédés de compostage	475
3.2. Les zones fonctionnelles d'une plateforme de compostage classique en andains avec retournements	478
3.3. Les matériels et leurs fonctions	482
4. L'exploitation des plateformes de compostage des déchets verts	485
4.1. La maîtrise de la conduite du compostage	485
4.2. Le bilan matière et la perte de masse au cours du compostage	490
4.3. La gestion des tontes de gazon	492
5. La qualité du compost de déchets verts	494
5.1. Caractéristiques agronomiques et stabilité	494
5.2. Présence d'éléments traces métalliques	495
5.3. Présence d'agents pathogènes	495
5.4. Présence de produits phytosanitaires	496
6. Conclusion	496

CHAPITRE 15

Caractéristiques des biodéchets et traitement par les collectivités en compostage industriel

Thomas Colin, Renaud Piquemal, Carine Frederich, Cécilia Blanc, Guillaume Boucherie ...	499
1. La caractérisation du gisement de biodéchets	499
1.1. Qu'appelle-t-on les biodéchets ?	499

1.2. Le cadre réglementaire	500
1.3. Les caractéristiques physico-chimiques des biodéchets	503
2. Le traitement des biodéchets par compostage industriel	508
2.1. Articulation entre compostage industriel et compostage de proximité	508
2.2. Les principales étapes du processus de compostage industriel de biodéchets	509
3. La maîtrise des risques	521
3.1. Le contrôle des intrants	521
3.2. La traçabilité des matières à composter	521
3.3. Le suivi des paramètres de compostage	522
3.4. Les risques de contamination croisée	523
3.5. La gestion des eaux	524
3.6. La gestion des odeurs	524
3.7. Le contrôle de la qualité des composts	526

CHAPITRE 16

Procédés et traitements par compostage des effluents d'élevages

Paul Robin, Jean-Marie Paillat, Élise Lorinquer, Claude Aubert, Aurore Toudic, Jean-Luc Farinet, Daniel Cluzeau, Paul Ponchant, Pascal Levasseur, Bertrand Le Bris, Jacques Capdeville, Didier Oudart, Nouraya Akkal-Corfini, Mélynda Hassouna	531
1. Spécificités des effluents d'élevages et intérêt de leur compostage	532
1.1. Nécessité de renouveler les objectifs traditionnels liés à l'élevage	532
1.2. Nécessité de passer de catégories distinctes à une continuité de situations	533
1.3. Les enjeux spécifiques aux effluents d'élevages	535
2. Les gisements d'effluents d'élevages	536
2.1. L'importance du volume d'effluents d'élevages concernés par le compostage	536
2.2. Filière bovine	538
2.3. Filière avicole	540
2.4. Filière porcine	540
2.5. Les substrats carbonés	542
2.6. Biodégradabilité des effluents d'élevages	543
3. Les procédés de compostage des effluents d'élevages	545
3.1. Le compostage « naturel » des effluents d'élevages	546
3.2. Les procédés d'imprégnation-compostage	553
3.3. Quelques exemples de procédés spécifiques de compostage	557
4. Inscrire le compostage dans une dynamique d'adaptation continue	563
4.1. Adapter la production des substrats	563
4.2. Adapter le procédé à des conditions climatiques variées	569
4.3. Réduire les impacts environnementaux, notamment les émissions vers l'air	570
4.4. Définir des caractéristiques prioritaires des composts	571
4.5. La modélisation comme outil de capitalisation des connaissances, d'aide à la décision, de formation	574
5. Conclusion	576

CHAPITRE 17

Procédés de traitement aérobique dans la filière TMB (Traitements Mécano-Biologiques) – Production de composts, stabilisation avant stockage ultime

Rémy Bayard, Rémy Gourdon	585
1. Gestion intégrée des DMA (Déchets Ménagers et Assimilés)	586
2. Principe et objectifs	588
2.1. TMB et stockage ultime	588
2.2. TMB et valorisation énergétique par voie thermochimique	589
2.3. TMB et valorisation de la matière organique	590

2.4. TMB et méthanisation	590
2.5. TMB et recyclage	591
3. Cadre législatif et réglementaire	591
3.1. Au niveau de l'Union Européenne	591
3.2. Cadre législatif et réglementaire en France	593
4. Les différentes approches et filières	594
4.1. Les 4 scénarios de traitement mécano-biologique des OMR	594
4.2. Prétraitement mécanique des OMR	595
4.3. Prétraitement biologique	597
5. Maîtrise des émissions solides, liquides et gazeuses lors de la mise en œuvre des TMB	601
5.1. Cadrage général	601
5.2. Émissions gazeuses et aéroportées	602
5.3. Qualité des déchets traités	603
5.4. Évaluation de la « stabilité » de la MO après traitement	603
6. Exemples d'installations de TMB	605
6.1. Scénario 1 : Production de biogaz (valorisation énergétique)	605
6.2. Scénario 2 : Production d'un amendement organique (valorisation agricole)	606
6.3. Scénario 3 : Production de CSR (valorisation énergétique)	608
6.4. Scénario 4 : Production d'un déchet stabilisé (stockage ultime en ISDND)	609

CHAPITRE 18

Modalités d'apports des composts en agriculture

Bertrand Decoopman, Blaise Leclerc	615
1. Rôle de la matière organique apportée aux sols	615
2. Taux optimum de matière organique pour le sol	617
3. Raisonnement de la dose de matière organique à apporter au sol	618
3.1. Calcul de la dose basé sur « l'effet azote »	618
3.2. Calcul de la dose basé sur le bilan humique	619
3.3. Ajustement de la dose par rapport au phosphore et autres éléments	621
4. Sélection du PRO et des dates d'épandage	623
5. Spécificités de l'utilisation des composts en agriculture biologique	624
5.1. Principe de la réglementation européenne concernant la production biologique	624
5.2. Les composts utilisables en agriculture biologique	626
5.3. Les composts non utilisables en agriculture biologique	627
6. Les apports par systèmes de culture	628
6.1. L'apport des composts en grandes cultures	628
6.2. L'apport des composts sur prairies	629
6.3. L'apport de composts en maraîchage	630
6.4. L'apport de composts en cultures pérennes	631
7. Les techniques d'épandage du compost et de travail du sol	633
7.1. Épandage de compost de type solide divisé grossier	633
7.2. Épandage de composts de type solide dispersé	634
7.3. Travail du sol	635

Index	637
-------------	-----

PRÉFACE

Économique et écologique, le compostage est une pratique très ancienne dont l'attrait réémerge dans nos sociétés face aux défis de notre temps que sont le changement climatique, les transitions écologique, énergétique et l'augmentation de la démographie. En effet, le compostage permettant de valoriser les déchets biodégradables par un processus de transformation en un produit stabilisé et de restituer la matière organique au sol, participe à en améliorer la structure, la porosité, la résistance à l'érosion et surtout la capacité d'absorption des substances nutritives par les plantes, jouant un rôle important dans la préservation de la fertilité des sols, la biodiversité mais aussi dans la séquestration du carbone.

Face au développement de l'agriculture intensive, on semble redécouvrir que l'un des fondements de la durabilité de notre modèle agricole reste la préservation du sol et surtout du sol fertile ce qui impose d'approfondir nos connaissances de ce milieu complexe et d'adapter nos pratiques agronomiques.

Ainsi la matière organique des sols devient aujourd'hui un enjeu pour maintenir la capacité productive de notre agriculture, mais aussi pour sa capacité de séquestration du carbone et son rôle fondamental dans son impact sur le réchauffement climatique. L'initiative quatre pour mille, visant à augmenter les stocks de matières organiques dans les sols, lancée par la France a été ainsi largement reprise au niveau mondial lors de la COP 21. Des programmes de recherche sur la connaissance des sols sont lancés. Tous les grands pays se dotent de stratégie de « bioéconomie », avec à la clé l'économie circulaire, l'importance de valoriser les déchets et la nécessité de « boucler les cycles », notamment en matière d'azote, de phosphore et de potassium qui sont des éléments clés pour la sphère végétale.

Dans ce contexte, la multiplication des plateformes de compostage, la mise en place d'une réglementation sur les amendements et supports de cultures, que cela soit à travers deux normes NF ou un « Ecolabel » européen visant à garantir la qualité sanitaire des composts commercialisés, démontre l'intérêt pour ce processus économique et assez simple de valorisation des déchets.

L'engouement général de la population pour le développement du compostage, notamment à travers la mobilisation autour de journées pour promouvoir le compostage de proximité, et le développement de l'agriculture « urbaine » marque aussi une forme de prise de conscience collective.

Souvent présenté comme un processus rustique, de nombreuses recherches ont été menées pour assurer la compréhension et la maîtrise technique du compostage permettant aujourd'hui son large développement et on ne peut que se féliciter de l'initiative visant à rassembler dans un seul ouvrage l'ensemble des connaissances autour de ce sujet, qui, à y regarder de plus près, s'avère beaucoup plus complexe que ce que l'on croit...

Jean-Marc Bournigal
Directeur Général de l'AGPB
Président d'Irstea (2012-2017)

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage est un travail collectif. Il a fait appel aux chercheur(euse)s, ingénieur(e)s et technicien(ne)s spécialistes du domaine. L'exercice fut long et exigeant. Je souhaite exprimer à chacun des auteur(e)s mes plus chaleureux remerciements.

Je souhaite également vivement remercier mes collègues, Céline Druilhe, Anne-Marie Pourcher et Patrick Dabert. Leurs conseils, leurs relectures et leur dynamisme ont été un soutien précieux et une aide déterminante.

J'exprime également mes sincères remerciements à Jean-Marc Bournigal dont la contribution nous honore.

INTRODUCTION

Les sols remplissent des services écosystémiques indispensables à la vie humaine. Walter *et al.* (2015) explicitent ces services en quatre groupes :

- approvisionnement en aliments pour les humains et les animaux, en matériaux, organiques ou minéraux, ainsi que pour leurs ressources génétiques et leurs fonctions de support physique ;
- régulation par le stockage, la transformation et le transfert, de l'eau et des éléments (carbone, azote, oxygène, phosphore, etc.), transitant naturellement par les sols mais également apportés par les activités anthropiques ;
- services culturels ;
- services d'auto-entretien.

La matière organique (MO) des sols est un élément déterminant du maintien de ces services par son incidence sur leur structure physique, leurs caractéristiques chimiques et leur activité biologique, (Roussel *et al.*, 2001).

L'appauvrissement en MO des sols résulte de pratiques culturales favorisant les pertes et les exportations non compensées par les apports en MO. L'incidence du réchauffement climatique sur la teneur en MO des sols est incertaine, celui-ci pouvant favoriser le couvert végétal au profit de l'accroissement de la teneur en MO mais pouvant également augmenter la minéralisation de cette dernière au détriment de sa teneur dans les sols (Gis Sol, 2011).

Les sols sont le premier réservoir de carbone devant les végétaux et l'atmosphère. De faibles variations des teneurs en carbone dans les sols peuvent impacter significativement les teneurs en CO₂ dans l'atmosphère (Walter *et al.*, 2015). Une augmentation relative de 4 pour mille par an des stocks de matière organique des sols suffirait à compenser l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre de la planète tout en augmentant les rendements de production (Le Foll, 2015). Cet accroissement passe par une augmentation du couvert végétal, l'utilisation de produits organiques, des systèmes de cultures diversifiées, le développement de l'agroforesterie.

En France, le stock de carbone est en baisse dans un certain nombre de situations agricoles bien identifiées (nord, Bassin parisien, centre, grand sud-ouest, couloir rhodanien) (Gis Sol, 2011). En 2001, Roussel *et al.* (2001) ont évalué qu'un redressement de 10 % de la concentration en MO des sols français de teneur en MO inférieure à 2 % nécessiterait l'apport sur ces sols de 3,7 à 5,5 millions de tonnes de MO humifiée soit un apport de 30 à 44 millions de tonnes d'amendement organique de type compost ou encore de 114 à 166 millions de tonnes de fumier pailleux de bovin. Ces travaux donnent un ordre de grandeurs des besoins estimés. Ils mettent également en exergue l'intérêt du compostage qui permet d'accroître la stabilité de la matière organique contenue dans les déchets et produits résiduels organiques (PRO).

Le compostage présente d'autres intérêts, requis ou opportuns, en vue d'une valorisation sur les sols. Il permet d'hygiéniser les déchets et les PRO, d'accroître leur siccité, de réduire leur masse, de réduire leurs hétérogénéités physiques ainsi que d'éliminer les odeurs nauséabondes des matières fraîches en décomposition.

Le compostage présente également des atouts techniques et économiques. Il est applicable à des masses de déchets pouvant aller de quelques dizaines de kilogrammes à plusieurs centaines de tonnes. C'est un procédé robuste, dont la mise en œuvre

peut être rustique et dont les coûts d'investissements et de fonctionnement sont souvent plus faibles que ceux des autres technologies de traitement.

De fait, le compostage est privilégié dans la hiérarchie des modes de gestion des déchets (Directive n° 2008/98/CE, Ordonnance n° 2010-1579, loi du 12 juillet 2010 dite Grenelle de l'environnement II).

La part de déchets organiques et PRO traités par compostage témoigne également de l'intérêt pour le procédé.

La production annuelle de déchets organiques et de PRO en France est de l'ordre de 325 millions de tonnes (hors déjections laissées aux sols). Le [tableau 1](#) donne la répartition des tonnages estimés en fonction de l'origine du déchet ou du PRO.

Tableau 1. Estimation des gisements de déchets et produits résiduaire organiques d'après Ademe (2016), Masero (2010), FranceAgriMer (2015).

En millions de tonnes par an							
Déchets municipaux			Déchets des industries			Déchets agricoles	
collectés par le service public ¹	organiques en gestion domestique ²	organiques autres ³	IAA ⁴	papeterie (boues, résidus ligneux)	Autres	Effluents d'élevage hors déjections aux pâturages	Résidus de cultures et sylviculture
20,2	5,1	16,3	30,5	1	0,8	120	130

1 : Déchets de cuisine : 7,1 Mt., Papiers-cartons, textiles sanitaires : 7,2 Mt., Déchets verts : 5,9 Mt.

2 : Compostage individuel ou de proximité

3 : dont Boues de STEP : 9 Mt., Déchets verts (collectivités et entreprises) : 4,2 Mt., Restauration : 1,1 Mt., Commerces alimentaires : 0,8 Mt., Marchés : 0,4 Mt.

4 : 2,6 Mt. en MS de boues et effluents, (hyp. de calcul : MS # 10 %) et 805,1 kt. MS de déchets organiques (hyp. de calcul : MS # 20 %)

L'Ademe a estimé qu'en France, en 2014, 8,5 Mt. de déchets ménagers et assimilés (DMA) avaient été envoyées en compostage au sein des installations de traitement des ordures ménagères (ITOM), soit 16 % de la masse de déchets traitée au sein de ces ITOM, aboutissant à la production de 3,1 Mt. de composts (Ademe, 2016). En 2014, la France comptait 626 centres de compostage de DMA. Par ailleurs, l'Ademe estimait à 5,1 Mt. la quantité de déchets valorisés par compostage individuel. À ces masses s'ajoutent celles des autres déchets organiques pour partie également compostés tels que les boues, les déchets verts et les fumiers.

En 2010, EUROSTAT estimait que 15 % des déchets municipaux produits dans l'UE étaient traités par compostage. L'Autriche est le pays où la fraction de déchets compostés est la plus élevée. Elle composte 40 % de ses déchets ménagers, soit 2 Mt., auxquelles s'ajoutent 1,5 Mt. de déchets compostés en individuel. Elle compte 550 installations de compostage.

Malgré le rôle déterminant des composts dans la préservation de la qualité des sols et leur contribution à la lutte contre le réchauffement climatique, malgré les atouts tant techniques qu'économiques du procédé, les développements technologiques et les avancées scientifiques dont il a fait l'objet et la place prépondérante qu'il occupe, peu d'ouvrages sont consacrés au compostage. Celui-ci a pour objectifs de faire le point ainsi que de transférer les connaissances et savoir-faire acquis sur le procédé ces dernières années. Son élaboration s'est fondée sur la sollicitation des spécialistes du compostage, des composts et de la maîtrise de leurs impacts. Il a été laissé à

chacun des auteurs le choix de l'esprit de sa contribution. Celle-ci a pu être une revue exhaustive de la littérature ou a pu mettre en avant une vision plus personnelle de la problématique traitée dans le chapitre. L'ouvrage s'adresse aux étudiants, aux chercheurs, aux enseignants-chercheurs, aux ingénieurs et aux décideurs.

L'ouvrage comporte quatre parties.

Les transformations de la matière en compostage sont continues. Pour autant, il est courant de distinguer deux phases : la première au cours de laquelle la stabilisation opère de façon prépondérante par biodégradation de la matière organique la plus biodégradable, la seconde au cours de laquelle la stabilisation opère majoritairement par réorganisation-humification de la matière organique. La première phase se traduit par des transformations rapides de la matière telles qu'un accroissement important de sa température, son séchage, l'élimination des mauvaises odeurs, etc. Les besoins en aération au cours de cette phase sont élevés. La seconde phase se traduit par des transformations lentes, moins aisément perceptibles. Les besoins en aération sont négligeables au regard de ceux de la première phase.

La nature des transformations de la matière, leurs cinétiques et les besoins associés en O_2 ont amené à distinguer ces deux étapes nommées respectivement phases active et de maturation. Techniquement mais également du point de vue scientifique, c'est la première phase qui a fait l'objet du plus de développements. De fait, de nombreux chapitres de l'ouvrage et en particulier ceux de la première partie sont focalisés sur les processus et déterminants intéressant la phase active. La maturation n'a pas fait l'objet d'un chapitre spécifique. Les processus et les transformations de la matière qui lui sont associées ont été abordés dans les chapitres 1 et 7 de l'ouvrage.

La mise en œuvre de l'aération de la matière est un critère de distinction des procédés de compostage. Les procédés se fondant sur une aération forcée, souvent positive, sont les plus répandus. De fait, de nombreux chapitres de l'ouvrage et en particulier ceux de la Partie I font une large place aux procédés par aération forcée positive. Les procédés mettant en œuvre une aération par retournement de la matière ou par application d'une aération forcée négative ont fait l'objet de moins de développements.

La Partie I intéresse les processus, les effets et les déterminants des traitements par compostage.

Le chapitre 1 est consacré aux aspects biologiques et microbiologiques du compostage. Les chapitres 2, 3 et 4 développent les processus et déterminants des transferts de masse, de la biodégradation et des transferts de chaleur conditionnant les transformations de la matière en phase active. Le chapitre 5 s'intéresse aux transformations et transferts de l'azote.

La Partie II traite des intérêts écologiques et agronomiques des composts. Le chapitre 6 développe les effets de l'apport de composts sur la biodiversité des sols, le chapitre 7, l'effet de leur apport et caractéristiques sur l'enrichissement en MO des sols, leur fertilité et leur structure.

La Partie III s'intéresse aux impacts sanitaires et environnementaux des composts et aux émissions gazeuses en compostage. Les chapitres 8, 9 et 10 sont consacrés à la maîtrise de la qualité sanitaire des composts : élimination des pathogènes, antibiorésistance et devenir des composés traces organiques. Le chapitre 11 traite des impacts sanitaires des émissions gazeuses en unités de compostage. Le chapitre 12 donne les facteurs d'émissions et aborde les processus et déterminants des émissions


et odeurs en compostage. Le chapitre 13 développe les voies de captage, de dispersion et de traitement des odeurs en compostage.

La Partie IV est consacrée aux applications à différents déchets et PRO des procédés de compostage ainsi qu'aux modalités d'usage des composts en agriculture. Les chapitres 14, 15, 16 traitent respectivement des procédés appliqués au compostage des déchets verts, des biodéchets, des effluents d'élevage. Le chapitre 17 s'intéresse aux applications du compostage dans la filière des traitements mécano-biologiques (TMB). Le chapitre 18 développe les conditions d'usage des composts en agriculture classique et biologique.

Nous espérons que cet ouvrage sera une source d'information, qu'il suscitera la réflexion et inspirera la créativité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Ademe (2015). Fiche technique Le compostage.
2. Ademe (2016). Déchets Chiffres-clés. 94 p.
3. FranceAgriMer (2015). L'observatoire national des ressources en biomasse. Évaluation des ressources disponibles en France. Les études de FranceAgriMer. 114 p.
4. Gis Sol. 2011. Synthèse sur l'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 24 p.
5. Roussel O, Bourmeau E, Walter C (2001). Évaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Étude et Gestion des Sols*, 8(1) : 65-81.
6. Walter C, Bispo A, Langlais A, Schwartz C, Chenu C (2015). Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cahier – Club Demeter*, 15 : 51-68.
7. Le Foll S (2015). Déclaration de M. Stéphane Le Foll, ministre de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, porte-parole du gouvernement, sur les éléments de solution de l'agriculture dans la lutte contre le réchauffement climatique, *Conférence scientifique internationale « Agriculture intelligente face au climat »*, 17 mars 2015, Montpellier, France.



Les sols remplissent des services écosystémiques indispensables à la vie humaine parmi lesquels celui d'approvisionnement en aliments et de régulation, par le stockage, la transformation et le transfert, de l'eau et des éléments tels que le carbone, l'azote, etc.... La matière organique est un élément déterminant du maintien de ces services de par son incidence sur la structure physique des sols, leurs caractéristiques chimiques et leur activité biologique. De fait, si le retour au sol de la matière organique issue du compostage des déchets et des produits résiduaux organiques est une pratique ancestrale, son intérêt ressurgit aujourd'hui face aux défis démographiques, alimentaires, climatiques et sociétaux auxquels nous sommes confrontés. L'un des intérêts du procédé, et non des moindres, réside également dans sa robustesse et sa rusticité. Pour autant, des points de vigilance demeurent tant côté impacts du procédé que côté qualité des composts.

Cet ouvrage fait le point sur les avancées scientifiques et techniques effectuées ces dernières années dans le domaine du compostage et des composts. Élaboré en quatre parties, il traite tour à tour : des processus, des effets et des déterminants des procédés par aération forcée (Partie 1), des intérêts écologiques et agronomiques des composts (Partie 2), des risques sanitaires et environnementaux associés au procédé et à l'apport au sol de composts (Partie 3). La quatrième partie est dédiée à une approche substrat de la filière ainsi qu'à une revue des modalités d'usage des composts en agriculture classique et biologique.

Coordonné par **Amaury de Guardia**, directeur de recherche au centre Irstea de Rennes, cet ouvrage a réuni de nombreux chercheur(euse)s, ingénieur(e)s et technicien(ne)s spécialistes du domaine. Il s'adresse aux étudiants, aux chercheurs, enseignants-chercheurs mais aussi aux ingénieurs et aux décideurs leur permettant une vision claire et globale du sujet.