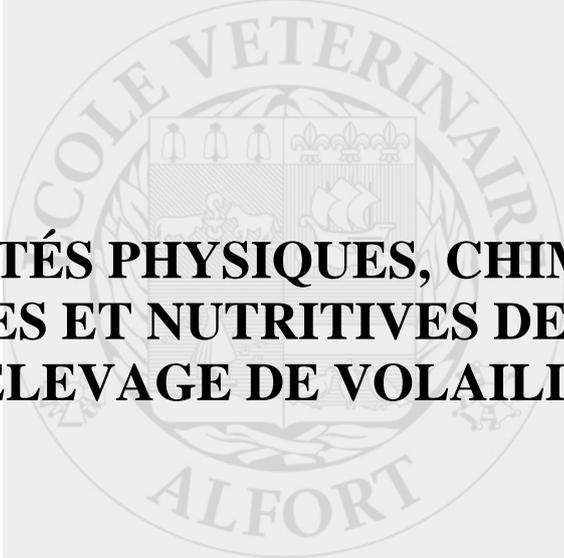


Année 2010



**PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, CHIMIQUES,
BIOLOGIQUES ET NUTRITIVES DES LITIÈRES
EN ÉLEVAGE DE VOLAILLES**

THESE

Pour le

DOCTORAT VÉTÉRINAIRE

Présentée et soutenue publiquement devant

LA FACULTE DE MEDECINE DE CRETEIL

le

par

Anne BALTAZART

Née le 08 Juin 1984 à Reims (Marne)

JURY

Président : M.

Professeur à la Faculté de Médecine de CRETEIL

Membres

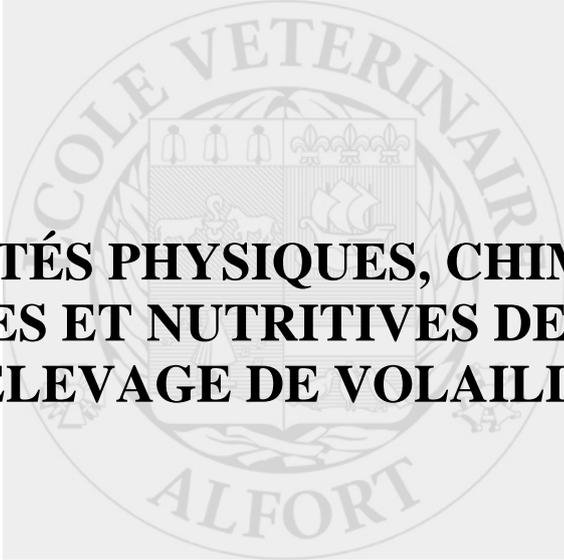
Directeur : Mr ARNE

Maître de conférences à l'ENVA

Assesseur : Mr MILLEMANN

Maître de conférences à l'ENVA

Année 2010



**PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, CHIMIQUES,
BIOLOGIQUES ET NUTRITIVES DES LITIÈRES
EN ÉLEVAGE DE VOLAILLES**

THESE

Pour le

DOCTORAT VÉTÉRINAIRE

Présentée et soutenue publiquement devant

LA FACULTE DE MEDECINE DE CRETEIL

le 20 Mai 2010

par

Anne BALTAZART

Née le 08 Juin 1984 à Reims (Marne)

JURY

Président : M.

Professeur à la Faculté de Médecine de CRETEIL

Membres

Directeur : Mr ARNE

Maître de conférences à l'ENVA

Assesseur : Mr MILLEMANN

Maître de conférences à l'ENVA

LISTE DES MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT

Directeur : M. le Professeur MIALOT Jean-Paul

Directeurs honoraires : MM. les Professeurs MORAILLON Robert, PARODI André-Laurent, PILET Charles, TOMA Bernard

Professeurs honoraires : MM. BRUGERE Henri, BUSSIERAS Jean, CERF Olivier, CLERC Bernard, CRESPEAU François
LE BARS Henri, MOUTHON Gilbert, MILHAUD Guy, ROZIER Jacques,

DEPARTEMENT DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET PHARMACEUTIQUES (DSBP)

Chef du département : Mme COMBRISSEON Hélène, Professeur - Adjoint : Mme LE PODER Sophie, Maître de conférences

<p>- UNITE D'ANATOMIE DES ANIMAUX DOMESTIQUES Mme CREVIER-DENOIX Nathalie, Professeur M. DEGUEURCE Christophe, Professeur Mme ROBERT Céline, Maître de conférences M. CHATEAU Henry, Maître de conférences*</p> <p>- UNITE DE PATHOLOGIE GENERALE MICROBIOLOGIE, IMMUNOLOGIE Mme QUINTIN-COLONNA Françoise, Professeur* M. BOULOUIS Henri-Jean, Professeur M. FREYBURGER Ludovic, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE PHYSIOLOGIE ET THERAPEUTIQUE Mme COMBRISSEON Hélène, Professeur* M. TIRET Laurent, Maître de conférences Mme STORCK-PILOT Fanny, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE PHARMACIE ET TOXICOLOGIE Mme ENRIQUEZ Brigitte, Professeur M. TISSIER Renaud, Maître de conférences* M. PERROT Sébastien, Maître de conférences</p> <p>- DISCIPLINE : ETHOLOGIE M. DEPUTTE Bertrand, Professeur</p>	<p>-UNITE D'HISTOLOGIE, ANATOMIE PATHOLOGIQUE M. FONTAINE Jean-Jacques, Professeur * Mme BERNEX Florence, Maître de conférences Mme CORDONNIER-LEFORT Nathalie, Maître de conférences M. REYES GOMEZ Edouard, Maître de conférences contractuel</p> <p>- UNITE DE VIROLOGIE M. ELOIT Marc, Professeur * Mme LE PODER Sophie, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE GENETIQUE MEDICALE ET MOLECULAIRE M. PANTHIER Jean-Jacques, Professeur Mme ABITBOL Marie, Maître de conférences*</p> <p>- UNITE DE BIOCHIMIE M. MICHAUX Jean-Michel, Maître de conférences* M. BELLIER Sylvain, Maître de conférences</p> <p>- DISCIPLINE : ANGLAIS Mme CONAN Muriel, Professeur certifié</p> <p>- DISCIPLINE : EDUCATION PHYSIQUE ET SPORTIVE M. PHILIPS, Professeur certifié</p>
---	---

DEPARTEMENT D'ELEVAGE ET DE PATHOLOGIE DES EQUIDES ET DES CARNIVORES (DEPEC)

Chef du département : M. POLACK Bruno, Maître de conférences - Adjoint : M. BLOT Stéphane, Professeur

<p>- UNITE DE MEDECINE M. POUCHELON Jean-Louis, Professeur* Mme CHETBOUL Valérie, Professeur M. BLOT Stéphane, Professeur M. ROSENBERG Charles, Maître de conférences Mme MAUREY Christelle, Maître de conférences Mme BENCHEKROUN Ghita, Maître de conférences contractuel</p> <p>- UNITE DE CLINIQUE EQUINE M. DENOIX Jean-Marie, Professeur M. AUDIGIE Fabrice, Professeur* Mme GIRAUDET Aude, Praticien hospitalier Mlle CHRISTMANN Undine, Maître de conférences Mme MESPOULHES-RIVIERE Céline, Maître de conférences contractuel Mme PRADIER Sophie, Maître de conférences contractuel M. CARNICER David, Maître de conférences contractuel</p> <p>- UNITE DE REPRODUCTION ANIMALE Mme CHASTANT-MAILLARD Sylvie, Professeur (rattachée au DPASP) M. NUDELMANN Nicolas, Maître de conférences M. FONTBONNE Alain, Maître de conférences* M. REMY Dominique, Maître de conférences (rattaché au DPASP) M. DESBOIS Christophe, Maître de conférences Mme CONSTANT Fabienne, Maître de conférences (rattachée au DPASP) Mme DEGUILLAUME Laure, Maître de conférences contractuel (rattachée au DPASP)</p> <p>- DISCIPLINE : URGENCE SOINS INTENSIFS Mme Françoise ROUX, Maître de conférences</p>	<p>- UNITE DE PATHOLOGIE CHIRURGICALE M. FAYOLLE Pascal, Professeur * M. MOISSONNIER Pierre, Professeur M. MAILHAC Jean-Marie, Maître de conférences M. NIEBAUER Gert, Professeur contractuel Mme VIATEAU-DUVAL Véronique, Maître de conférences Mme RAVARY-PLUMIOEN Béangère, Maître de conférences (rattachée au DPASP) M. ZILBERSTEIN Luca, Maître de conférences M. JARDEL Nicolas, Praticien hospitalier</p> <p>- UNITE D'IMAGERIE MEDICALE Mme BEGON Dominique, Professeur* Mme STAMBOULI Fouzia, Praticien hospitalier</p> <p>- DISCIPLINE : OPHTALMOLOGIE Mme CHAHORY Sabine, Maître de conférences</p> <p>- UNITE DE PARASITOLOGIE ET MALADIES PARASITAIRES M. CHERMETTE René, Professeur * M. POLACK Bruno, Maître de conférences M. GUILLOT Jacques, Professeur Mme MARGNAC Geneviève, Maître de conférences Mme HALOS Lénaïg, Maître de conférences (rattachée au DPASP) M. HUBERT Blaise, Praticien hospitalier</p> <p>- UNITE DE MEDECINE DE L'ELEVAGE ET DU SPORT M. GRANDJEAN Dominique, Professeur * Mme YAGUIYAN-COLLIARD Laurence, Maître de conférences contractuel</p> <p>- DISCIPLINE : NUTRITION-ALIMENTATION M. PARAGON Bernard, Professeur</p>
---	---

DEPARTEMENT DES PRODUCTIONS ANIMALES ET DE LA SANTE PUBLIQUE (DPASP)

Chef du département : M. MILLEMANN Yves, Maître de conférences - Adjoint : Mme DUFOUR Barbara, Professeur

<p>- UNITE DES MALADIES CONTAGIEUSES M. BENET Jean-Jacques, Professeur* Mme HADDAD/ HOANG-XUAN Nadia, Professeur Mme DUFOUR Barbara, Professeur Melle PRAUD Anne, Maître de conférences contractuel</p> <p>- UNITE D'HYGIENE ET INDUSTRIE DES ALIMENTS D'ORIGINE ANIMALE M. BOLNOT François, Maître de conférences * M. CARLIER Vincent, Professeur Mme COLMIN Catherine, Maître de conférences M. AUGUSTIN Jean-Christophe, Maître de conférences</p> <p>- DISCIPLINE : BIostatISTIQUES M. DESQUILBET Loïc, Maître de conférences contractuel</p>	<p>- UNITE DE ZOOTECHNIE, ECONOMIE RURALE M. COURREAU Jean-François, Professeur M. BOSSE Philippe, Professeur Mme GRIMARD-BALLIF Bénédicte, Professeur Mme LEROY Isabelle, Maître de conférences M. ARNE Pascal, Maître de conférences M. PONTER Andrew, Professeur*</p> <p>- UNITE DE PATHOLOGIE MEDICALE DU BETAAIL ET DES ANIMAUX DE BASSE-COUR M. MILLEMANN Yves, Maître de conférences Mme BRUGERE-PICOUX Jeanne, Professeur (rattachée au DSBP) M. MAILLARD Renaud, Maître de conférences M. ADJOU Karim, Maître de conférences * M. BELBIS Guillaume, Maître de conférences contractuel</p>
---	--

* Responsable de l'Unité

REMERCIEMENTS

Au Président du Jury,
Professeur de la faculté de Médecine de Créteil,
Pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de cette thèse.

Hommage respectueux.

Au Docteur vétérinaire Pascal Arné,
Maître de Conférences à l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort,
Pour son soutien, son écoute, sa gentillesse et sa disponibilité,
tout au long de l'élaboration de ce travail.

Remerciements chaleureux.

Au Docteur vétérinaire Yves Millemann,
Maître de Conférences à l'École Nationale Vétérinaire d'Alfort,
Pour m'avoir fait l'honneur d'être l'assesseur de cette thèse.

Sincères remerciements.

TABLE DES MATIERES

INDEX DES FIGURES	4
INDEX DES TABLEAUX	5
INDEX DES ABREVIATIONS	6
INTRODUCTION	9
I. LA LITIERE, MILIEU DE VIE DES ANIMAUX	11
A. Caractéristiques de la litière	13
B. Les différentes fonctions de la litière	14
1. Isolation.....	14
2. Confort des animaux	14
3. Absorption de l'humidité	16
4. État de la litière	16
5. Zonage dans le bâtiment	17
C. L'écosystème litière	18
1. Biocénose de la litière	18
2. Émissions gazeuses au cours de l'élevage des oiseaux	26
D. Gestion de la litière	29
1. Traitements chimiques de la litière	30
2. Inoculation des litières avec des flores microbiennes.....	30
E. Modifications des litières : causes	31
1. Ambiance	31
2. Sol	32
3. Espèce animale et âge	33
4. Litière.....	33
5. Densité des animaux	34
6. Type de démarrage.....	34
7. Aménagement et équipement du bâtiment d'élevage	34
8. Problèmes pathologiques	34
9. Alimentation	35
F. Dégradation des litières : conséquences	37
G. Composition des fumiers.....	39
1. Quantification des effluents produits en fonction du type de volaille	39
2. Taux d'humidité.....	41
3. Concentration en macroéléments	42
4. Concentration en éléments traces.....	45
II. ÉVACUATION, STOCKAGE ET TRANSFORMATIONS SIMPLES DES FUMIERS	49
A. Identification rapide du fumier par spectrométrie fluorescente à rayons X.....	51
B. Différentes pratiques d'évacuation du fumier hors du bâtiment d'élevage.....	51

C.	Stockage du fumier.....	52
1.	Influence du taux d'humidité.....	52
2.	Évolution biologique des fumiers au cours du stockage.....	53
3.	Stockage en piles et assainissement du fumier.....	55
D.	Compaction du fumier.....	57
E.	Compostage du fumier.....	57
1.	Évolution biologique des fumiers au cours du compostage.....	58
2.	Compostage en piles.....	61
3.	Techniques Okada ND et Hosoya ND	62
4.	Différents exemples de co-compostages.....	63
5.	Amendements pour les composts.....	65
6.	Recommandations et conclusion.....	65
F.	Granulation.....	66
III.	LES LITIERES, AMENDEMENTS POUR LES SOLS.....	69
A.	Épandage sur les cultures.....	71
1.	Systèmes de gestion informatique des épandages.....	71
2.	Contexte agricole du Sud Est des Etats-Unis d'Amérique.....	72
3.	Épandage sur différents types de cultures.....	73
4.	Conséquences des épandages sur les nutriments et les hormones dans le sol.....	81
5.	Influence des épandages de fumier sur la biodiversité du sol.....	97
6.	Conséquences de l'épandage sur la dissémination ou le contrôle des agents pathogènes..	99
7.	Stratégies disponibles pour réduire les nuisances liées à l'épandage du fumier.....	102
B.	Décontamination des sols avec les litières de volaille.....	104
1.	Décontamination des explosifs (DNT sur les terrains militaires).....	104
2.	Décontamination du plomb.....	104
IV.	ALTERNATIVES A L'EPANDAGE POUR LE RECYCLAGE DES LITIERES.....	107
A.	La litière, aliment.....	109
1.	Incorporation de la litière dans la ration alimentaire du bétail.....	109
2.	Acceptation de la viande par le consommateur.....	115
3.	Détection de la litière de volaille dans les aliments destinés au bétail.....	116
4.	Additifs pour la litière (L-carnitine).....	116
B.	La litière, source d'énergies.....	117
1.	Calorimétrie de la litière de volaille.....	117
2.	Combustion et co-combustion.....	119
3.	Biométhanisation, gazéification.....	122
4.	Pyrolyse.....	126
C.	La litière, milieu de culture pour les bactéries.....	130
	CONCLUSION.....	131
	BIBLIOGRAPHIE.....	133
	ANNEXE 1 : Glossaire général.....	147

ANNEXE 2 : Le cycle du carbone.....	165
ANNEXE 3 : Le cycle de l'azote	167
ANNEXE 4 : Le cycle du phosphore.....	169
ANNEXE 5 : Les éléments traces.....	171

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : conséquences de la dégradation des litières.	38
Figure 2 : vue en microscopie électronique à balayage.	55
Figure 3 : bilan des transformations du fumier au cours du compostage.	61
Figure 4 : schématisation du système Hosoya.	62
Figure 5 : vue schématique d'un épandeur de déchets solides (a) et photographie du côté gauche de l'épandeur (b).	76
Figure 6 : calcul des émissions par bilan matière.	95
Figure 7 : schéma de la chambre de combustion à lit fluidisé.	120
Figure 8 : étapes de la digestion anaérobie.	123
Figure 9 : schéma de procédé de la fabrication de charbon activé.	127
Figure 10 : cycle du carbone et élevage de volailles (Annexe 2).	165
Figure 11 : cycle de l'azote et élevage de volailles (Annexe 3).	167
Figure 12 : cycle du phosphore et élevage de volailles (Annexe 4).	169
Figure 13 : schéma de l'acquisition des teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Milieux anthropisés (Annexe 5).	172

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : principales recommandations concernant la litière.....	30
Tableau 2 : estimations du fumier produit en fonction du type de volaille..	41
Tableau 3 : taux de carbone des fumiers en fonction du type de volaille.	42
Tableau 4 : composition en azote des fumiers en fonction du type de volaille.	43
Tableau 5 : composition en phosphore des fumiers en fonction du type de volaille.	44
Tableau 6 : taux de potassium dans les fumiers en fonction du type de volaille.	45
Tableau 7 : composition en hydrogène, oxygène et soufre des fumiers de poulet de chair et de dinde.	45
Tableau 8 : composition en éléments traces des fumiers de poulet de chair.	46
Tableau 9 : composition en éléments traces des fumiers de poules pondeuses..	46
Tableau 10 : composition en éléments traces des fumiers de canards.	46
Tableau 11 : pertes d'azote par volatilisation à l'intérieur des bâtiments par rapport à l'azote excrété.....	96

INDEX DES ABREVIATIONS

As :	Arsenic
As(V) :	Arséniate
ADF :	Acid Detergent Fibre
ADN :	Acide DésoxyriboNucléique
AGV :	Acide Gras Volatile
ARN :	Acide RiboNucléique
atm :	Atmosphère
BET :	Brunner-Emmet-Teller
Br :	Brome
C :	Carbone
Ca :	Calcium
CITEPA :	Centre Interprofessionnel Technique de l'Étude de la Pollution Atmosphérique
CH ₄ :	Méthane
Cl :	Chlore
ClF ₃ :	Trifluorure de Chlore
Cl ₂ O :	Monoxyde de Chlore
ClO ₂ :	Dioxyde de Chlore
CO :	Monoxyde de Carbone
CO ₂ :	Dioxyde de Carbone
CORPEN :	Comité d'Orientation pour les Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement
COV :	Composés Organiques Volatils
CP :	Carboxyméthyl Pyrazole
CSHPPF :	Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
CSV :	Composés Soufrés Volatils
Cu :	Cuivre
CUD :	Coefficient d'Utilisation Digestive
CVA :	Charge Volumique Appliquée
Da :	Dalton
DCO :	Demande Chimique en diOxygène
DNT :	DiNitroToluène
EDTA :	Acide Ethylène Diamine Tétra Acétique
ESB :	Encéphalopathie Spongiforme Bovine
ETM :	Elément Trace Métallique (anciennement métaux lourds)
F :	Fluor
FAN :	Free Ammonia Nitrogen (Azote Ammoniacal Libre)
FDA :	Food and Drug Administration (Administration de l'Alimentation et des Médicaments)
F ₂ O :	Fluorure d'Oxygène
FI-TR :	Spectroscopie Infrarouge Transformée de Fourier
GC% :	Pourcentage de Guanine et Cytosine
GF :	Glucides Fermentescibles
H :	Hydrogène

H ₂ :	Dihydrogène
ha :	Hectare
H ₂ O :	Eau
H ₂ S :	Sulfure d'Hydrogène
HCl :	Chlorure d'Hydrogène
HCN :	Acide Cyanhydrique
IG :	Indice de Germination
IR :	Infrarouge
K :	Potassium
K :	Kelvin
kJ :	Kilojoule
kg :	Kilogramme
kPa :	KiloPascal
kV :	Kilovolt
m :	Mètre
MS :	Matière Sèche
Mn :	Manganèse
M :	Molaire
mg :	Milligramme
MPN :	Most Probable Number (Nombre le plus probable)
MWe :	Méga Watt Electrique
N :	Azote
N :	Newton
ND :	Nom Déposé
N ₂ O :	Hémioxyde ou protoxyde d'azote
NO ₃ ⁻ :	Nitrate
NH ₃ :	Ammoniac
NO _x :	Oxyde d'Azote
N ₂ O :	Hémioxyde d'Azote
NH ₄ ⁺ :	Ammonium
NaOH :	Soude
NDF :	Neutral Detergent Fibre
Ni :	Nickel
OR :	Odds Ratio
OTU :	Unité Taxonomique Opérationnelle
P :	Phosphore
Pas :	Pascal seconde
pb :	Paire de bases
Pb :	Plomb
PCR :	Polymerase Chain Reaction (Réaction de polymérisation en chaîne)
PCS :	Pouvoir Calorifique Supérieur
PMR :	Protéines Microbiennes du Rumen
ppm :	Partie par million
ppmv :	Partie par million en volume
PSNA :	PolySaccharides Non Amylacés
PT :	Phosphore Total
PTDI :	Protéines Totales Digestibles dans l'Intestin

PV :	Poids Vif
PVC :	Polychlorure de Vinyle
SO _x :	Oxyde de Soufre
SO ₂ :	Dioxyde de Soufre
SPIR :	Spectrométrie dans le Proche Infrarouge
t :	Tonne
TAN :	Total Ammonia Nitrogen (Azote Ammoniacal Total)
TNT :	TriNitroToluène
TSH :	Temps de Séjour Hydraulique
UAN :	Urée Ammonium Nitrate
UASB :	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Lit de Boues Expansées)
UFC :	Unité Formant Colonie
uo :	Unité Odorante
USDA :	United States Department of Agriculture (Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis d'Amérique)
USEPA :	United States Environmental Protection Agency (Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis d'Amérique)
UV :	Ultraviolet
W :	Watt
Zn :	Zinc

INTRODUCTION

La litière de **volaille**¹ est destinée à accueillir les animaux, depuis le premier jour jusqu'au départ pour l'abattoir. Ses propriétés doivent donc lui permettre de fournir un **substrat** approprié pour l'élevage des oiseaux, mais évoluent au fil de leur croissance. La litière recueillie, entre autres, les **fientes** des oiseaux, et se transforme en conséquence différemment en fonction de l'espèce qui est élevée. Elle contient également de nombreux organismes micro- et macroscopiques dont le cycle biologique peut être largement tributaire de la façon dont elle est gérée. De nombreux facteurs peuvent conditionner la qualité de la litière au cours de l'élevage. Il en est ainsi de la conception du bâtiment, des pratiques d'élevage, de la pathologie notamment digestive affectant les oiseaux ou encore de leur alimentation. D'autre part, on peut distinguer au sein du poulailler des zones de la litière de qualités variables en fonction de leur localisation par rapport aux lignes d'abreuvement ou des chaînes d'alimentation en particulier.

À la fin de la bande de **volailles**, le **fumier** est évacué hors du bâtiment. Sa composition varie fortement en fonction de la nature du **substrat** d'origine et de l'espèce de volatile élevée. Les quantités produites annuellement se chiffrent à 12 millions de tonnes aux Etats-Unis d'Amérique et 2,5 millions de tonnes en France (ITAVI, 2001b), par exemple. Le **fumier de volaille** a une valeur nutritive élevée et est utilisé comme **engrais** organique, recyclant ainsi certains **nutriments** comme l'**azote**, le **phosphore** et le potassium. Il a donc été traditionnellement épandu sur les terres cultivées et les pâtures. Il permet d'augmenter dans certains cas la productivité des cultures et de réduire l'érosion. Cependant, un **épandage** non respectueux des besoins des cultures n'est pas sans conséquences : il peut conduire à une pollution de l'air et de l'eau contribuant ainsi à l'effet de serre et à l'**eutrophisation** des cours d'eau. Il est également impliqué dans la dissémination d'agents pathogènes lorsqu'il n'est pas traité de façon adéquate. Pour limiter ce risque, il faut donc trouver des solutions appropriées, tant pérennes que viables sur le plan économique de stockage, de réduction des volumes produits et de recyclage. Les organismes potentiellement pathogènes qu'il contient devront être contrôlés en fonction de la destination du produit final. Toutes les méthodes d'assainissement du **fumier** ne sont pas équivalentes, seules certaines d'entre elles permettent une destruction efficace des agents pathogènes. Le **compostage**, sous certaines conditions, peut en faire partie.

D'autres stratégies de recyclage du **fumier** ont donc été développées. Une des options existantes consiste à l'incorporer à la ration du bétail. Cette pratique est controversée car le **fumier** pourrait constituer un vecteur de transmission de nombreux agents pathogènes. Il reste néanmoins une source de **nutriments** bon marché dans beaucoup d'endroits du globe. Une autre option consiste à récupérer l'énergie emmagasinée par la litière pendant l'élevage des oiseaux, sous forme d'énergie thermique, électrique ou gazeuse.

Enfin, à toutes les étapes de son cycle de vie, la litière est responsable d'importantes émissions gazeuses potentiellement très polluantes. De nombreuses stratégies ont été mises au point ou sont en cours de développement pour réduire ces émissions, à chaque étape, l'objectif étant d'aboutir à une

¹ Tous les mots qui apparaissent **en gras** dans le texte sont définis, soit dans le glossaire principal (Annexe 1) soit, pour les définitions se rapportant au carbone, à l'azote, au phosphore ou aux éléments traces, dans l'Annexe 2, Annexe 3, Annexe 4 ou Annexe 5, respectivement.

gestion intégrée de la litière, au bénéfice de l'environnement. Chaque solution nouvelle de recyclage de la litière doit s'inscrire dans une démarche de pollution minimale de la terre, de l'eau comme de l'air.

L'objectif de cette thèse est de réaliser un travail de synthèse sur les connaissances bibliographiques disponibles relatives à la gestion de la litière en présence d'oiseaux et les méthodes de recyclage du **fumier**.

Nous décrivons tout d'abord la litière pour son utilité première : l'élevage des **volailles** ; puis l'évacuation, le stockage et les transformations simples (compactage, **compostage**, **granulation**) du **fumier** seront abordées ; ensuite, l'**épandage** du **fumier** et ses conséquences seront envisagées et les techniques alternatives à l'**épandage**, comme l'alimentation du bétail ou la récupération d'énergie seront traitées dans une dernière partie.

I. LA LITIERE, MILIEU DE VIE DES ANIMAUX

A. Caractéristiques de la litière

La litière peut être définie comme un « lit de paille ou d'autres matières végétales, souple, isolant et absorbant, qu'on étend dans les bâtiments d'élevage pour servir de couche aux animaux » (Larousse, 2009). Le **substrat** d'origine va évoluer considérablement pendant la phase d'élevage résultant en une combinaison de composition variable et évolutive de déjections accumulées, de plumes, de matériel absorbant (Bernhart *et al.*, 2010), de déchets d'aliments (Abelha *et al.*, 2003). Le matériel absorbant (« bedding material » en anglais) initial est souvent désigné sous le nom de « litière » tandis que le terme « **fumier** » est réservé préférentiellement au mélange contenant les **fientes** (Kelleher *et al.*, 2002).

Le matériau servant de support de litière en **volailles** de chair doit présenter les qualités suivantes : il doit être un bon isolant thermique, souple, confortable, absorber l'humidité, être peu poussiéreux et sain.

Plusieurs types de **substrat** sont disponibles sur le marché :

- les copeaux de bois : ils ne doivent pas avoir été traités par des biocides et provenir de bois blanc (cèdre, *Cedrus spp.* par exemple) ou de résineux (pin, *Pinus* par exemple). Les copeaux ont une grande capacité d'**absorption** en eau, constituent un bon isolant thermique et sont confortables pour les animaux ;
- la sciure de bois est généralement déconseillée pour les **volailles** à cause de problèmes de conservation de l'humidité absorbée, de la formation de croûtes favorisée et de la production de poussière ;
- la paille de blé entière : elle est étalée directement dans le bâtiment sans aucun traitement mécanique particulier. Elle devra être sèche, sans foin et dépoussiérée, afin d'éviter certaines affections respiratoires comme l'aspergillose. Elle est actuellement déconseillée car elle ne présente pas toutes les qualités requises et notamment un faible pouvoir absorbant ;
- la paille de blé hachée : hachée mécaniquement, elle donne un produit très souple. Les brins sont courts et la litière plane et homogène. Il est préférable de procéder au hachage à l'extérieur du bâtiment à cause des poussières générées ;
- la paille de blé broyée, défibrée, dépoussiérée : le broyage permet d'éclater les tiges rigides de la paille. De ce fait, le pouvoir de rétention en eau de la litière sera augmenté. Au démarrage du lot de poussins, il est nécessaire que la litière soit bien égalisée.

Plus anecdotiquement, en Europe et en fonction de la localisation géographique, on peut utiliser :

- les coques d'arachide ou de riz ;
- la paille de riz ;
- le chanvre ;
- les **anas de lin** ;
- les aiguilles de pin ;
- ou les lambeaux de papier (Bernhart et Fasina, 2009 ; Liechty *et al.*, 2009 ; McGahan *et al.*, 2008 ; ITAVI, 1997a ; Jacquet, 2007).

Un autre paramètre intervient dans le choix du matériel absorbant, c'est le prix. Ainsi, les **anas de lin** constituent une excellente litière et leur prix reste raisonnable (Jacquet, 2007). Les coûts de

revient peuvent ainsi être classés dans l'ordre croissant : paille entière, puis paille hachée ou paille broyée défibrée ou mélange paille-copeaux, puis copeaux (ITAVI, 1997a).

Le mot « **fumier** » (« manure » en anglais) est également parfois utilisé pour décrire les excréments seuls. Nous lui préféreront le terme « **fientes** ». Les **fientes** de **volaille** constituent une masse importante de matières organiques facilement **fermentescibles**. Leur teneur en **azote** est élevée, de l'ordre de 20 % en moyenne (ITAVI, 1997b). Elle est due à l'excrétion combinée de l'urine et des fèces chez les **volailles**. L'**azote** est excrété principalement sous forme d'acide urique, un composé azoté non protéique, et principal catabolite final du métabolisme des purines. Les **fientes** de **volaille** ont une concentration élevée en **azote** qui se décompose sous forme d'acide urique (61 %), d'**azote** organique (31 %) et d'ammoniac (8 %) (Rodhe et Karlsson, 2002).

En conclusion, dans cette thèse, on utilisera le mot « litière » pour désigner le matériel absorbant seul ou l'évolution du mélange de matériel absorbant et des **fientes** et des autres composants (plumes, déchets d'aliment). Enfin, le terme « **fumier** » désignera le produit obtenu après le départ des animaux.

B. Les différentes fonctions de la litière

1. Isolation

La litière contribue à l'obtention et au maintien d'une température ambiante adaptée en isolant le sol. Sa capacité isolante dépend de son épaisseur et de sa nature. Ainsi, une épaisseur de 10 à 15 cm de paille hachée (soit 6 kg/m²) correspond à un **coefficient d'isolation K** d'environ 0,60 W/m²K.

La litière isole thermiquement les animaux du sol, en minimisant les pertes par **conduction** principalement à partir des pattes et éventuellement du bréchet, tant que celui-ci n'est pas complètement emplumé ou lorsque ces parties anatomiques sont souillées ou lésées. Lorsque les **volailles** se déplacent ou se reposent sur une litière humide, une thermolyse importante peut s'opérer à partir des pattes et du bréchet, provoquant ainsi un refroidissement important à ce niveau. La dégradation de la litière peut donc augmenter jusqu'à 5 ou 6 °C la **température critique inférieure** des oiseaux (ITAVI, 1997a).

2. Confort des animaux

a) Confort physique

La litière contribue au confort des animaux et limite l'apparition de lésions (ampoules) au niveau du bréchet. Ces lésions peuvent survenir lorsque les animaux restent au contact d'un sol trop dur, croûté et trop froid (ITAVI, 1997a et 2009).

b) Développement comportemental

Le « bain de poussière » est observé chez de nombreuses espèces d'oiseaux. C'est une séquence comportementale complexe qui débute chez le poulet (*Gallus gallus domesticus*) par le grattage et le picorage du **substrat**. L'oiseau érige d'abord son plumage puis s'accroupit dans le **substrat**. Une fois étendu au sol, l'animal entreprend une séquence chronologique en quatre phases principales : il

bat des ailes avec le corps à la verticale, frotte la tête, picore et gratte avec une patte le **substrat**. Survient ensuite une phase pendant laquelle l'oiseau, plumes aplaties sur le corps, passe plus de temps couché ou se frottant sur le côté, entrecoupée de mouvements plus dynamiques. Environ 20 minutes après le premier battement d'ailes vertical, l'oiseau se relève et se débarrasse de la poussière en s'ébrouant, avant de retourner à d'autres activités.

Pour un animal donné disposant d'un accès illimité à la litière, ce comportement est observé en moyenne tous les 2 jours. En l'absence de litière ou d'autre matériel disponible, les **volailles** pratiquent un « bain de poussière à vide » reproduisant alors la séquence comportementale à l'identique, mais sur le sol nu (Olsson et Keeling, 2005).

Ces constatations ont conduit l'Union Européenne à modifier la législation : en 2012, toutes les poules pondeuses devront avoir accès à une litière. Cette modification réglementaire a été suivie par l'apparition de cages dites aménagées, contenant **bacs à poussière**, nids et perchoirs. Malgré cela, les poules continuent à exprimer le bain de poussière à vide, bien qu'elles aient accès à un **bac à poussière**, comme l'ont montré Olsson *et al.* (2002). L'accès précoce à un **substrat** donné influence également la préférence des animaux pour le bain de poussière à l'âge adulte : ainsi les oiseaux élevés sur herbe et sable préfèrent-ils le sable ou le sol, tandis que ceux élevés sur grillage picorent davantage la nourriture que la litière, et piquent le plumage des autres oiseaux (Olsson et Keeling, 2005).

Le nombre de bains de poussière à l'âge adulte est inférieur pour les oiseaux élevés en l'absence de la litière que pour ceux qui sont élevés sur du sable ou de la paille (Johnsen *et al.*, 1998 dans Olsson et Keeling, 2005).

En conclusion, les oiseaux, élevés avec ou sans litière, développent tous un comportement de bain de poussière dont la fréquence ne varie pas significativement en fonction de la présence ou non d'un **substrat** particulière. L'apparition de cages équipées de **bacs à poussière** ne s'est pas accompagnée d'une diminution du nombre de séquences de bain de poussière à vide observées.

Le type de **substrat** utilisé affecte également la structure du comportement de bain de poussière : des poussins élevés sur du grillage ou sur du sable ont été observés pendant 3 phases, (1) de J2 à J5, (2) de J8 à J15 et (3) de J20 à J23. Pendant les phases 1 et 3, les bains de poussière duraient moins longtemps chez les animaux élevés sur grillage, chez lesquels le **picage**, incluant l'allopicage remplaçait le picorage (Larsen *et al.*, 2000 dans Olsson et Keeling, 2005).

Sanotra *et al.* (1995, dans Olsson et Keeling, 2005) a conditionné des poussins à réaliser des bains de poussière dans de la paille, des copeaux de bois ou des plumes. Aucune différence de comportement n'a été trouvée entre les **substrats** pendant la phase de préparation. La préférence pour un **substrat** donné était ensuite testée en proposant aux oiseaux 2 types litières simultanément, à savoir celui auquel ils avaient été habitués, et le sable. Les oiseaux choisissaient progressivement le sable, abandonnant le **substrat** initial. Ceci s'accompagnait d'une augmentation du temps de latence précédant la séquence du bain de poussière.

D'une manière générale, les **volailles** préfèrent les **substrats** à structure fine comme le sable ou la **tourbe** à ceux qui présentent une structure plus grossière comme les copeaux de bois, la paille, les plumes ou les cosses de riz. Lorsque l'on compare sable et **tourbe**, aucune différence significative quant à la préférence n'est observée (Olsson et Keeling, 2005).

Vestergaard *et al.* (1997, dans Olsson et Keeling, 2005) ont étudié le lien entre le retrait de la litière et le stress des animaux en mesurant le taux de cortisol des poules placées dans diverses conditions

potentiellement stressantes. Les oiseaux étaient répartis en deux lots élevés soit en l'absence litière soit en présence de sable. A partir de 32 à 34 mois, ceux élevés sur grillage passaient sur litière de sable et inversement. Les taux de cortisol étaient similaires entre les groupes avant le changement, et l'augmentation du taux de cortisol était plus importante pour les oiseaux élevés initialement sur litière.

En conclusion, le stimulus visuel semble important dans la motivation des poules pour la pratique du bain de poussière, ainsi que l'expérience précoce de la litière pour les animaux. Le fait de supprimer l'accès à la litière constitue un stress important pour les animaux.

Dans les élevages intensifs helvétiques de poules pondeuses en volières, le **picage** des plumes et le cannibalisme constituent un problème majeur. Il concerne non seulement les adultes mais également les poussins. Huber-Eicher et Sebö (2001) ont montré que l'accès à la litière lors des deux premières semaines de vie permettait de diminuer significativement le **picage** des plumes chez les très jeunes oiseaux. Sept volières localisées dans 6 fermes ont été utilisées pour cette étude : chaque volière était divisée en deux compartiments. Dans le premier compartiment (compartiment expérimental), les poussins avaient un accès illimité à la litière de copeaux de bois pendant les deux premières semaines de vie, tandis que dans le deuxième compartiment (compartiment témoin), ils étaient élevés sur une grille plastique jusqu'à 15 jours d'âge. Ensuite, les animaux des deux lots disposaient d'un accès illimité à la litière. Deux sessions d'observation ont été réalisées, à la 5^e et à la 14^e semaine respectivement, pour noter le nombre d'animaux présentant des plumes abîmées ou manquantes, les interactions agonistiques (**picage**), les comportements de fouille du sol (comportement enregistré la 5^e semaine seulement).

Les poussins du premier lot montraient significativement moins de **picage** des plumes et moins d'oiseaux avaient les plumes de la queue endommagées lors des deux sessions. Par ailleurs, ils passaient significativement plus de temps à fouiller le sol. En revanche, aucune différence significative n'a été observée sur la mortalité des oiseaux entre le compartiment expérimental et le témoin.

La mise à disposition précoce de la litière permet donc de diminuer significativement le **picage** des plumes chez les **volailles** placées en volière ; l'accès illimité à la litière pendant une longue durée (12 semaines) ne permet cependant pas de compenser l'absence d'accès lors des deux premières semaines de vie. En revanche, cette étude n'a pas permis de montrer une influence de la présence ou l'absence permanente de litière sur le cannibalisme.

3. Absorption de l'humidité

Par temps doux et humide, lorsque la ventilation est insuffisante et que l'air circulant ne peut plus absorber d'humidité, la litière joue un rôle « d'absorbeur d'humidité », qu'elle restitue d'ailleurs par la suite (ITAVI, 1997a).

4. État de la litière

L'état de la litière dépend de multiples facteurs que l'éleveur doit maîtriser. Par contre, l'effet saison est plus difficilement maîtrisable. Dans le cas de fortes chaleurs, une litière peu épaisse, voire humide, est susceptible faciliter la thermorégulation des animaux. En revanche, une telle litière aura

des inconvénients majeurs (voir E. 4. c)). Par temps humide et doux, il est préférable d'avoir une litière épaisse pour augmenter sa capacité d'absorption d'eau (ITAVI, 1997a).

Une bonne litière doit être :

- sèche : de façon à assurer le confort thermique des animaux ;
- saine : elle ne doit pas être le support de développement d'agents pathogènes ni de poussières ;
- souple : pendant toute la durée de l'élevage, pour assurer le confort physique des animaux ;
- pas trop **fermentescible** (voir C. 2. b)) pour éviter les dégagements d'ammoniac ;
- absorbante : afin d'assurer l'absorption de l'humidité des **fientes** ;
- épaisse : car il est difficile de maintenir une litière correcte si son épaisseur est insuffisante au départ.

A contrario, une mauvaise litière sera :

- humide : cet état favorisera les dégagements d'ammoniac et détériorera le confort des animaux (difficultés de déplacement, perte de chaleur importante par **conduction**, brûlures sur les différents points d'appui ou de contacts, aux pattes, aux genoux, au bréchet). L'addition de **superphosphate** peut permettre d'assécher la litière ;
- grasse : lors d'**entérites** sévères, certaines protéines plasmatiques (collagène, fibrinogène) sont excrétées en quantités importantes dans la litière, lui conférant ainsi cet « aspect gras ». Cet état de la litière peut provenir également de l'excrétion de matières grasses non digérées ;
- croûtée : le phénomène de croûtage est susceptible de se développer dans les zones où il y a des pertes d'eau sous les abreuvoirs notamment. Un stress thermique froid peut également induire des diarrhées responsables de la formation d'une croûte. L'Institut Technique Avicole conseille de repailler à la demande pour éviter ce défaut. Certains éleveurs passent préalablement un motoculteur pour casser les croûtes de la litière et l'aérer de nouveau ;
- poussiéreuse : les poussières en suspension constituent des supports très efficaces de dissémination de différents microorganismes pathogènes notamment à tropisme respiratoire, (ITAVI, 1997a, 2009).

Un test simple proposé par Jacquet (2007) pour évaluer l'humidité de la litière consiste à saisir une poignée de litière et à la comprimer. Si, lorsqu'on ouvre la main, la litière tombe en morceaux, cela indique que sa teneur en humidité est d'environ 20 à 25 %. Si, en revanche, la litière est trop humide, elle restera en masse compacte lorsqu'on ouvre la main.

5. Zonage dans le bâtiment

À l'intérieur d'un bâtiment d'élevage, il existe plusieurs zones distinctes par leur aspect et leur teneur en humidité (ITAVI, 1997a).

- la zone « abreuvoir » est caractérisée par sa teneur importante en humidité, d'autant plus si les abreuvoirs fuient ou ne sont pas équipés de récupérateurs ;
- la zone « mangeoire » est relativement humide car généralement assez chargée en déjections. On y trouve également des particules alimentaires ;
- La zone « dortoir » est généralement la plus sèche de tout le bâtiment.

a) Zones humides

Les oiseaux, dans la mesure où ils en ont la possibilité, s'éloignent d'eux-mêmes des zones de vie inconfortables, en particulier autour des abreuvoirs où la litière est croûtée et humide (plus de 60 % d'humidité).

Les lames d'air mesurées à ce niveau présentent une température plus faible : 15 à 20 °C pour une ambiance à 21 °C.

Les animaux vivant dans ces zones humides présentent un plumage souillé et humide, un bréchet dégarni de plumes et souvent mouillé. C'est principalement à ces endroits du bâtiment que l'on dénombre le plus d'individus présentant des anomalies de type ampoules ou pustules.

Les pertes thermiques par **conduction** (pattes et bréchet) sont potentiellement importantes et se répercutent sur la physiologie des animaux (thermorégulation) ainsi que sur leurs performances zootechniques (**efficacité alimentaire**).

b) Zones sèches

Les emplacements secs, souples, voire chauds de la zone « dortoir » sont naturellement recherchés par les oiseaux sauf par fortes chaleurs. Cependant, les litières chaudes peuvent présenter l'inconvénient de produire trop d'ammoniac (voir C. 2. b)).

En conséquence, il existe donc une méthode d'entretien et de gestion du poste litière à respecter pour obtenir le meilleur équilibre au profit des animaux présents (ITAVI, 1997a).

C. L'écosystème litière

Au début de l'élevage, la litière est caractérisée par une teneur en matière sèche très élevée (supérieure à 90 % pour la sciure ou les copeaux de bois tendre, par exemple), une forte concentration en **carbone** (environ 50 % pour la sciure ou les copeaux de bois tendre), une faible teneur en **azote** (< 0,5 % à 1 % pour la sciure et les copeaux de bois tendre, respectivement) se présentant essentiellement sous forme insoluble. Le rapport **carbone/azote** s'inverse au fur et à mesure que s'accumulent les déjections animales. Ces dernières sont caractérisées par leurs très fortes concentrations en composés azotés hautement dégradables (acide urique notamment) et générateurs potentiels de grandes quantités d'ammoniac, mais aussi par leur richesse en eau qui entraîne l'abaissement progressif du taux de matière sèche au-dessous de 50 % (Zhu et Lee, 2005 ; Kim *et al.*, 2009 ; Guinebert et Pénaud, 2005).

1. Biocénose de la litière

Les litières de **volaille** sont des **écosystèmes** dynamiques qui évoluent pendant la phase d'élevage. Pour comprendre cette évolution, il est nécessaire de connaître les acteurs impliqués. Les litières peuvent également participer au cycle de nombreux organismes pathogènes pour l'Homme ou les animaux. De façon générale, la population microbienne des litières de **volaille** est composée de moisissures, d'algues et de bactéries **hétérotrophes** aérobies (bactéries acidophiles, actinomycètes et bactéries aérobies pouvant sporuler) (Gupta *et al.*, 2004).

a) Bactéries

(1) Population bactérienne générale

Peu d'études sont disponibles sur la population bactérienne des litières, les études portent surtout sur les bactéries pathogènes susceptibles de s'y trouver.

Lu *et al.* (2003) ont étudié la composition bactérienne de la litière de poulet de chair (sur litière de bois blanc) en utilisant à la fois les méthodes de mise en culture et d'identification moléculaire. Les bactéries aérobies étaient détectées par les méthodes de culture à partir de 10^9 UFC/g de litière. Les entérobactéries comme *Enterococcus* spp. et les coliformes représentaient 0,1 et 0,01 %, respectivement, des bactéries aérobies totales cultivables dans la litière. Aucune souche de *Salmonella* n'a été détectée par culture. Pour caractériser les groupes bactériens les plus importants, les auteurs ont ensuite séquencé les gènes d'ADN ribosomal 16S par PCR à partir de l'ADN total de la communauté microbienne isolé dans la litière. .

Douze familles ou groupes ont été ainsi identifiés avec comme représentants principaux *Lactobacilli* et *Salinococcus* spp. En effet, 82 % des séquences totales appartenaient à des bactéries Gram positives, dont 62 % à des taxons à faibles GC%. En plus de la détection des séquences d'ADN ribosomal 16S correspondant à des bactéries d'origine fécale, de nombreuses autres séquences bactériennes ont été détectées dans la litière: *Globicatella sulfidofaciens*, *Corynebacterium ammoniagenes*, *Corynebacterium urealyticum*, *Clostridium aminovalericum*, *Arthrobacter* spp., et *Denitrobacter permanens*. Celles-ci pourraient être impliquées dans la dégradation du bois et les cycles de l'**azote** et du soufre. D'autres séquences bactériennes correspondant à des agents pathogènes potentiels ont également été identifiées, à l'instar de *Clostridium*, *Staphylococsi*, et *Bordetella* spp. En revanche, n'ont pas été détectées *Salmonella*, les *Escherichia coli* pathogènes, *Campylobacter* spp., *Yersinia* spp., *Listeria* spp., ou les *Staphylococci* toxigéniques.

Il existe néanmoins des variations de la composition de la flore bactérienne en fonction des types de productions de **volaille** : Omeira *et al.* (2006) ont comparé les propriétés microbiologiques de la litière générée par les poules pondeuses et les poulets de chair élevés dans des systèmes de production intensive ou en plein air. L'analyse microbiologique consistait en une numération des bactéries totales, des coliformes totaux, des espèces de staphylocoques, de *Salmonella* et de *Clostridium perfringens*. La litière des poules pondeuses élevées présentait un comptage bactérien total plus faible que celle des poulets de chair indépendamment du système d'élevage choisi. La litière des pondeuses élevées en conditions intensives avait les plus faibles numérations en moyenne de coliformes totaux alors que le plus faible comptage en espèces de staphylocoques était observé dans la litière des pondeuses de plein air. Les comptages de *C. perfringens* étaient minimaux pour les **volailles** élevées de manière intensive et ce quel que soit le type de production.

En conclusion, les litières hébergent une très grande diversité bactérienne, laquelle varie selon l'espèce de **volaille** élevée et le type de **substrat** utilisé. Le développement de la PCR a permis de détecter et d'identifier de nombreuses bactéries non mises en évidence par les techniques classiques de mise en culture. Les bactéries Gram positives constituent plus de 80 % de la communauté de la litière par rapport aux *Enterobacteriaceae* qui représentent moins de 2 % de cette **biocénose** (Nandi *et al.*, 2004).

(2) Bactéries pathogènes pour l'Homme

Les poulets de chair sont souvent des porteurs de *Salmonella*, dont certains sérotypes (Typhimurium ou Enteritidis) sont responsables de toxi-infections alimentaires majeures chez l'Homme, dans lesquelles les produits de viande de **volaille** sont fréquemment incriminés. Afin d'éviter efficacement la contamination des produits d'origine animales par *Salmonella*, des mesures drastiques de contrôle doivent être mises en oeuvre au niveau des élevages pour réduire la prévalence du portage. Rose *et al.* (1999) ont essayé d'identifier les facteurs de risque relatifs à la contamination par *Salmonella* des bandes de poulets de chair industriels en France à la fin de la période d'élevage. Une étude prospective a été menée dans ce but en 1996 et 1997 sur 86 bandes de poulets de chair situées dans l'ouest du pays. Le statut des élevages vis-à-vis de *Salmonella* des bandes était évalué au moyen d'écouvillons de litière et d'échantillons de poussière analysés avec des méthodes bactériologiques classiques. Soixante bandes (70 %) avaient au moins un échantillon environnemental contaminé et étaient classées comme « bandes contaminées par *Salmonella* ». Une régression logistique a été utilisée pour évaluer l'impact des différentes pratiques d'élevage, des mesures d'hygiène générale, du niveau de contamination de l'environnement par *Salmonella* sur la probabilité de contamination de la bande par cette même bactérie à la fin de la période d'élevage. Les facteurs de risque identifiés comme significatifs étaient la contamination initiale du poulailler avant introduction des animaux et le portage de *Salmonella* sur les poussins d'un jour. Le risque de contamination d'une bande augmentait lorsque les camions d'aliments se garaient à proximité de l'entrée du vestiaire et lorsque l'aliment démarrage se présentait sous forme de farines, plutôt que sous forme de miettes.

Refrégier-Petton *et al.* (2001) ont tenté d'identifier les facteurs de risque associés cette fois à la contamination de bandes de poulets de chair français par un autre microorganisme important en termes de santé publique, à savoir *Campylobacter*. Ils ont travaillé sur 75 élevages de poulets de chair dans l'ouest de la France. Un questionnaire était fourni aux éleveurs et des échantillons de déjections fraîches étaient prélevés pour évaluer le statut de la bande de poulets de chair par rapport au germe cible. Moins de la moitié des bandes (42,7 %) étaient positives pour *Campylobacter* spp. Le risque de contamination de la bande de poulets par ce microorganisme augmentait dans les poulaillers fonctionnant en ventilation statique (OR = 20,8), dans les élevages comptant au moins 3 bâtiments (OR = 13,2), en été/automne (OR = 6,4), lorsque l'eau de boisson des poulets était acidifiée (OR = 4,2), ou que deux personnes ou plus s'occupaient de la bande de **volaille** (OR = 3,1). La présence de coléoptères provenant de la litière dans le vestiaire augmentait également le risque de contamination (OR = 5,0) contrairement à l'administration de traitements antibiotiques curatifs.

(3) Antibiorésistance

On estime qu'environ 80 % des élevages de **volaille** utilisent des antibiotiques dans l'alimentation aux Etats-Unis d'Amérique (Graham *et al.*, 2009b). Leur utilisation dans la production industrielle de poulet de chair se traduit par la sélection de bactéries antibiorésistantes dans les **fientes** de ces oiseaux.

Contrôler la dispersion des bactéries multirésistantes est illusoire si on ignore l'histoire naturelle des gènes de résistance, des éléments mobiles qui les portent, et des hôtes bactériens qui les contiennent. En utilisant des techniques des techniques de cultures classiques et de génétique

moléculaire, Nandi *et al.* (2004) ont quantifié les gènes d'antibiorésistance et les éléments mobiles (intégrons) dans la litière de poulailler d'élevages industriels de **volaille**. Contrairement à ce qui était attendu, le réservoir majeur des intégrons de classe 1 dans la litière de **volaille** n'est pas constitué par leurs hôtes précédemment identifiés, les *Entérobacteriaceae* Gram négatives, comme *Escherichia coli*. Les intégrons et les gènes de résistance associés abondent en effet dans différentes populations de bactéries Gram positives qui constituent plus de 80 % de la communauté de la litière par rapport aux *Enterobacteriaceae* représentant moins de 2 % de cette population.

Khan *et al.* (2005) ont tenté d'identifier plus précisément les souches multirésistantes d'*Enterococcus* spp. par leurs marqueurs de résistance et de virulence. Dans ce but, ils ont isolé trente souches multirésistantes d'*Enterococcus* spp., incluant deux issues de lait de vaches avec mammite, neuf de litière de poulet et dix-neuf de litière de dinde. Vingt-cinq d'entre elles ont été identifiées par des méthodes biochimiques comme étant *E. gallinarum* ou *E. faecalis*. La plupart des isolats étaient multirésistants (vancomycine, gentamicine, streptomycine, tétracycline, érythromycine, bacitracine, kanamycine, acide nalidixique) mais sensibles à la ciprofloxacine, au sulfaméthoxazole, au chloramphénicol, à l'ampicilline et à l'ofloxacine. Des tentatives d'amplification partielle des séquences de gènes ont été faites pour détecter les marqueurs de résistance à la vancomycine *vanA* (734 paires de bases), *vanB* (420 pb), *vanC1* (531 pb) et *vanC2-C3* (673 pb) ; les marqueurs de virulence *cylA* (427 pb) et *cylB* (225 pb) pour la cytolysine entérococcique et la protéine de surface de formation de biofilm (*Esp*). Des essais individuels et multiplex de PCR ciblant les marqueurs de résistance à la vancomycine ont mis en évidence le gène *vanC1* dans 22 souches d'*E. gallinarum*. Pour les isolats restants (*E. faecalis* et *E. gallinarum*), le gène porteur de la résistance n'a pu être identifié. Des niveaux intermédiaires de résistance à la vancomycine dans les entérocoques des animaux de rentes aux Etats-Unis d'Amérique étaient principalement dus à la présence du gène *vanC1*.

En conclusion, l'utilisation systématique et à large échelle aux Etats-Unis d'Amérique des antibiotiques dans la production des **volailles** a conduit à l'apparition de bactéries antibiorésistantes. Selon les études, les bactéries sont porteuses d'un ou plusieurs gènes de résistance, ce qui diminue l'arsenal thérapeutique utilisable chez les humains et les animaux atteints de maladies causées par ces bactéries.

(4) Évolution bactérienne de la litière au cours de l'élevage

L'accumulation progressive des **fientes** sur la litière favorise la prolifération de la flore bactérienne présente qui passe progressivement d'une concentration de 10^4 UFC/g dans la litière propre à 10^8 UFC/g dans le fumier. Les entérobactéries et les coliformes subissent une évolution encore plus importante puisque leur nombre peut être multiplié par un facteur 10^5 à 10^6 . Dans le même temps, on note la disparition de la flore anaérobie stricte présente dans les fèces au niveau de l'intestin des animaux et son remplacement, dans la litière, par une flore aérobie-anaérobie facultative opportuniste (Guinebert et Pénaud, 2005).

b) Protozoaires

Les coccidioses du poulet sont provoquées par des protozoaires parasites du genre *Eimeria*. Les coccidies, en dépit de la prophylaxie anticoccidienne (vaccination notamment) mise en place, peuvent engendrer des manifestations cliniques ou plus souvent une dégradation des performances zootechniques dans certains élevages, bande après bande, alors que le contrôle est efficace dans la majorité des exploitations avicoles recourant à ces programmes de contrôle.

Les coccidioses sont provoquées par l'ingestion d'oocystes sporulés. Les conditions favorables à leur sporulation sont l'humidité et la chaleur, en présence d'oxygène, lesquelles sont réunies dans la litière qui ne constitue cependant pas le milieu idéal à la survie prolongée des oocystes. Après 5 jours dans la litière, environ 95 % des oocystes d'*Eimeria acervulina* ont sporulé, mais jusqu'à 70 % d'entre eux peuvent avoir été endommagés, probablement sous l'action des bactéries ou de l'ammoniac. La viabilité des oocystes commence à s'effondrer au-delà de 3 semaines. Des oocystes viables peuvent être détectés dans la litière des poulets de chair reproducteurs vaccinés après 3 ou 4 mois seulement parce qu'ils ont été produits par des poulets vaccinés qui ont ingéré des oocystes et qui ont excrété en continu. La production et donc l'excrétion dans le milieu extérieur des oocystes diminuent au fur et à mesure que l'immunité des oiseaux se renforce.

En théorie, plus le climat est sec, moins il y a de problèmes de coccidiose, mais ceci n'est pas toujours observé en pratique : plusieurs études non publiées ont abouti à des résultats contraires. Une explication pourrait être donnée par la constatation expérimentale suivante : la sporulation des oocystes d'*Eimeria maxima* est la meilleure lorsque la litière contient initialement 5 % d'humidité et augmente progressivement jusqu'à 16 % en 106 heures et elle est la pire lorsque la litière contient initialement 60 % d'humidité et augmente jusqu'à 62 %. Une litière humide est propice au développement bactérien et à la production d'ammoniac, avec une diminution concomitante du taux de dioxygène, ce qui pourrait nuire à la sporulation d'*E. maxima* (Williams, 1998).

Répérant *et al.* (2007) ont suivi deux élevages de poulets de chair présentant des problèmes récurrents liés à la présence de coccidies. L'évolution des populations parasitaires a été analysée sur deux bandes consécutives dans chacun des deux bâtiments, avec un changement d'additif anticoccidien entre les deux bandes. L'excrétion des oocystes a été mesurée à partir de prélèvements de **fientes** effectués deux à trois fois par semaine. Des prélèvements de terre en surface dans et hors du bâtiment à la fin de la phase d'élevage des poulets puis pendant le vide sanitaire et de litière propre ont été également analysés pour rechercher la présence d'*Eimeria*.

Les coccidies ont été décelées dans les bâtiments à partir de 10-12 jours dans les prélèvements de **fientes** et plusieurs pics d'excrétion ont été observés au cours de l'élevage, reflétant les cycles de développement des protozoaires. Toutefois, dans une des bandes, le développement coccidien a été décalé dans le temps pour être maximal à 30 jours, après mise en place de matériel d'élevage neuf.

Dans les prélèvements de paille et d'eau, des œufs et des larves de nématodes ont été retrouvés, ainsi que des protozoaires ciliés, des acariens et leurs œufs, des rotifères, mais pas d'oocystes de coccidies. Dans un des échantillons de terre, des oocystes ont été observés après enrichissement par flottation en solution saline saturée. Les oocystes observés étaient de deux tailles différentes et correspondaient morphologiquement à *E. acervulina* et *E. maxima*. Aucun oocyste n'a été observé dans les autres échantillons de terre. L'absence d'oocystes de coccidies dans les échantillons environnementaux ne signifie pas qu'il n'y avait pas d'oocystes dans l'environnement, mais que leurs concentrations pouvaient avoir été inférieures au seuil de détection des techniques utilisées. En raison de la nature des prélèvements et leur traitement, ce seuil n'est pas quantifiable.

En conclusion, les litières sont un milieu favorable au cycle parasitaire des coccidies. Ces dernières peuvent survivre sous forme sporulée jusqu'à 3 semaines dans la litière. Entre deux bandes d'oiseaux, le sol du bâtiment semble jouer un rôle dans la persistance des coccidies. En revanche, la litière propre introduite dans le bâtiment avant l'arrivée d'une nouvelle bande ne semble pas participer à l'introduction de nouvelles coccidies.

c) Helminthes

Maurer *et al.* (2009), dans le cadre de six poulaillers industriels de poules pondeuses, ont examiné l'effet de la gestion d'une litière de paille de blé sur le taux d'humidité, le nombre d'œufs d'helminthes et l'**infectivité** de la litière en ciblant les nématodes intestinaux *Ascaris galli*, *Heterakis gallinarum* et *Capillaria* spp. Trois modalités de traitement ont été mis en place dans chaque poulailler en parallèle : dans le compartiment A, aucune intervention n'a été réalisée (zone témoin), dans le compartiment B, la litière humide et compactée était remplacée chaque semaine, et dans le compartiment C, de la litière neuve était ajoutée sur toute la surface de l'aire paillée chaque semaine. Le taux de matière sèche de la litière et les paramètres parasitologiques (concentration en œufs d'helminthes dans les échantillons de litière, comptage d'œufs fécaux dans le groupe d'animaux en ponte, prévalence d'helminthes et calcul de l'**infectivité** de la litière à partir de deux séries d'animaux **sentinelles**) ont été déterminés toutes les quatre semaines pendant les 32 premières semaines d'une période de ponte. Le taux de matière sèche de la litière variait dans une large gamme (48 à 95 %), huit semaines après le début de l'étude ; il y avait des différences significatives selon les sites de prélèvements mais pas entre les régimes de gestion. Les œufs d'*A. galli*/*H. gallinarum* étaient isolés dans 91 % des échantillons de litière, alors que les œufs de *Capillaria* spp. étaient retrouvés dans seulement 13 % des échantillons. Les concentrations en œufs de la litière sont restées à un niveau similaire pendant la période d'observation. Le type de gestion (B ou C) ne réduisait pas les concentrations en œufs d'helminthes dans la litière par rapport à l'absence de traitement (A). Les pondeuses commençaient à excréter des œufs d'helminthes huit semaines après introduction dans le poulailler. Dans le traitement C (litière ajoutée), les comptages d'œufs fécaux étaient plus bas que dans le traitement témoin à la 8^{ème}, 20^{ème} et 28^{ème} semaines. Il n'y avait pas de corrélation entre la concentration d'œufs d'helminthes dans la litière et les comptages d'œufs fécaux chez les pondeuses. La prévalence d'*A. galli* chez les animaux **sentinelles** était plus faible (< 10 %) que celles de *H. gallinarum* (68-80 %) et *Capillaria* spp. (30-58 %). Les prévalences et la charge en *H. gallinarum* ne différaient pas significativement entre les régimes de gestion. Bien que des concentrations en œufs d'helminthes élevées aient été trouvées dans la litière, la prévalence et la charge en larves chez les animaux **sentinelles** étaient faibles par rapport à une étude similaire réalisée avec des prélèvements effectués dans le passage des **volailles**. La litière affecterait négativement la diversité spécifique et l'**infectivité** des œufs d'helminthes. Cependant, les mécanismes sous-jacents ont besoin d'être clarifiés. Cette étude montre que *H. gallinarum* est l'helminthe principal transmis par la litière. Même si cette espèce est moins pathogène que *A. galli* (Permin et Hansen, 1998 dans Maurer *et al.*, 2009), elle est d'une grande importance à cause de son rôle dans la transmission du protozoaire *Histomonas meleagridis* responsable de l'histomonose ou maladie de la tête noire.

Par rapport à la zone de **parcours libre**, identifiée comme une source importante de contamination par tous les helminthes des **volailles** (Maurer *et al.*, 2009), la litière semble constituer un risque inférieur sur ce plan chez les poules pondeuses. Les auteurs suggèrent donc de concentrer la gestion préventive des helminthes autour de l'aire de **parcours libre**.

d) Insectes

La litière abrite de nombreuses espèces d'insectes, capables d'interagir entre elles. L'une des espèces d'intérêt est le ténébrion (*Alphitobius diaperinus*) qui envahit progressivement la litière dans les bâtiments d'élevage. *Alphitobius diaperinus* est un insecte nuisible d'origine tropicale introduit dans les zones tempérées. Tous les stades de ténébrion (*Alphitobius diaperinus*) sont

retrouvés dans la litière. Cet insecte est vecteur et donc susceptible de transmettre un nombre important d'agents pathogènes pour les **volailles** tels les virus de la maladie de Newcastle, de l'influenza aviaire, de la bursite infectieuse, de la maladie de Marek et de la variole aviaire. Il peut transmettre divers autres agents infectieux, incluant *Salmonella*, *Aspergillus* spp., *Escherichia coli*, *Bacillus* spp., *Streptococcus* spp., des Réovirus, des Rotavirus, *Eimeria* (coccidiose) et des plathelminthes.

La distribution spatiale d'*Alphitobius diaperinus* dans les sols des poulaillers a été étudiée par Salin *et al.* (2000), pendant un cycle de reproduction en hiver. Un échantillonnage de la litière après départ des oiseaux a été réalisé sur trois zones bien identifiées (1- au pied des murs, 2- sous les nourrisseurs et 3- dans l'aire centrale). Trois paramètres physiques ont été mesurés : l'humidité, la **densité** et la **compaction** en surface de la litière. De plus, les températures de la litière ont été enregistrées pendant la période d'élevage des poulets. La température du sol était également enregistrée après le **curage**. La structure spatiale de la population d'insectes dans la litière révélait une grande hétérogénéité : le dernier stade larvaire, les nymphes et les adultes étaient localisés dans le sol à 10 cm de profondeur, sous les nourrisseurs là où la **densité**, la **compaction** de surface et le taux d'humidité du sol étaient les plus faibles. La litière constitue un site favorable pour la pupaison et un refuge pour les adultes et les larves lors des périodes de stress et notamment quand la température du sol diminue pendant la phase de nettoyage du bâtiment. *A. diaperinus* réagissait à plus d'un stimulus impliquant des paramètres structurels édaphiques, l'hygrotactisme et le thermotactisme pour sélectionner des sites adaptés à sa préservation. Sa survie dans les zones tempérées dépend de l'utilisation opportuniste qu'il fait des sites chauds comme le sol des poulaillers de poules pondeuses.

D'autres insectes nuisibles sont également rencontrés en élevage avicole. Watson *et al.* (2001) ont observé les interactions de trois insectes communément rencontrés dans la litière de **volaille** : un coléoptère prédateur de la mouche domestique (*Musca domestica*), *Carcinops pumilio* (*Histeridae*) et deux insectes nuisibles lors de l'élevage des **volailles**, *Musca domestica* (*Muscidae*) et le ténébrion, *A. diaperinus* (*Tenebrionidae*). L'objectif était d'étudier le rôle de *C. pumilio* dans la régulation des populations de mouches domestiques. Des échantillons de litière ont été collectés chaque semaine dans les 5 poulaillers de l'étude, et les insectes en ont été extraits pour identification (espèces, stades larvaires) en utilisant des entonnoirs de Berlese-Tullgren. Quand les populations de *C. pumilio* égalaient ou dépassaient celle des larves de mouche domestique, les populations adultes des secondes n'étaient pas considérées comme posant problème. En effet, le contrôle des populations de *Musca domestica* était obtenu pour un *ratio* de 1:1 entre les larves des deux espèces. Les cohortes adultes et larvaires de *C. pumilio* variaient significativement selon les poulaillers. Les larves de *C. pumilio* étaient peu nombreuses dans les poulaillers abritant des populations adultes de ténébrions, suggérant un impact négatif de cette espèce sur l'établissement de l'*Histeridae*. Les études de laboratoire ont confirmé que les larves de ténébrion réduisaient significativement la survie des œufs ou des larves de *C. pumilio* ce qui n'était pas le cas des ténébrions adultes. Les recommandations des auteurs pour favoriser l'établissement de *C. pumilio* dans le poulailler sont donc les suivantes :

- relâcher *C. pumilio* à un taux d'une larve de mouche par ténébrion adulte. Cependant, avant d'entreprendre cette opération, la population de *A. diaperinus* doit être échantillonnée. Pour estimer la population, un échantillon de 400 cm³ est prélevé à la surface de la litière en début de bande, les insectes sont ensuite extraits en utilisant des entonnoirs de Berlese-Tullgren et comptés. Si les **densités** de ténébrions sont le double de celles de *C. pumilio* relâché, le protocole devra être abandonné ;

- maintenir à un faible niveau les populations de mouches domestiques en utilisant judicieusement des insecticides ciblant les mouches adultes lorsque la population de *C. pumilio* s'établit. Utiliser une pyréthrine générant de faibles résidus, appliquée en thermonébulisation ou sous forme d'appât pour les diptères. De tels insecticides sont recommandés parce qu'ils ont un impact minimal sur les insectes utiles ;
- après le nettoyage lors du processus de décontamination des bâtiments entre deux bandes successives, traiter le poulailler entier avec un insecticide efficace contre les ténébrions, de façon à obtenir un niveau de population inférieur à celui de *C. pumilio*.
- ne pas déplacer le **fumier** contenant des ténébrions dans un nouveau poulailler et relâcher sélectivement *C. pumilio*.

En conclusion, la litière contient de nombreux insectes dont les interactions sont parfois complexes. *A. diaperinus* vit dans la litière et s'y répartit selon une distribution spatiale hétérogène. On le retrouve plus particulièrement dans les zones chaudes et sèches. L'introduction raisonnée de certaines espèces (*C. pumilio*) permet aux éleveurs de contrôler les populations d'insectes nuisibles au sein des litières et de réduire en conséquence l'utilisation d'insecticides.

- Rôle des mouches dans la dissémination de bactéries antibiorésistantes

L'emploi d'antibiotiques comme additifs alimentaires dans les productions avicoles aux Etats-Unis d'Amérique a été reliée à la présence de bactéries antibiorésistantes chez les personnels des exploitations concernées, les consommateurs des produits de **volaille** et dans les environs des poulaillers où les animaux sont confinés. Ces bactéries pourraient ainsi être transmises aux populations vivant à proximité sans toutefois que les modalités de dissémination dans l'environnement soient bien documentées. Graham *et al.* (2009b) ont évalué la prévalence des entérocoques et des staphylocoques antibiorésistants dans la litière de **volaille** stockée et chez certaines espèces de mouches (*Muscidae* et *Calliphoridae*) collectées entre 15 et 100 m des bâtiments de **volailles** de chair. Des souches résistantes ont été isolées chez les insectes capturés près des installations d'alimentation des **volailles** dans l'été 2006. Des tests de sensibilité ont été conduits sur les isolats en sélectionnant des antibiotiques sur la base de leur importance en médecine humaine et de leur utilisation en production de **volaille**. Les isolats résistants font l'objet de recherche de déterminants antigéniques d'antibiorésistance. Un total de 142 isolats d'entérocoques et de 144 isolats de staphylocoques issus des échantillons s'insectes ou de litière de **volaille** a été identifiés. Les gènes de résistance *erm(B)*, *erm(A)*, *msr(C)*, *msr(A/B)* et des éléments génétiques mobiles associés au transposon de conjugaison Tn916 ont été trouvés dans les deux types de prélèvements. *erm(B)* était le gène de résistance le plus commun chez les staphylocoques. Les auteurs rapportent que les diptères piégés près des installations de **volaille** de chair pourraient être impliqués dans la dispersion des bactéries antibiorésistantes et ainsi augmenter l'exposition humaine à ces microorganismes.

En conclusion, la litière contient de nombreux organismes interagissant entre eux ; elle est le siège d'une multiplication bactérienne intense au cours de l'élevage des **volailles** qui s'accompagne d'une évolution progressive de la flore. La litière héberge aussi des protozoaires et des helminthes parasites. Certains cycles d'insectes se déroulent également en totalité ou en partie dans la litière, avec là encore des interactions complexes entre espèces, en partie élucidées. Pour toutes ces raisons, la litière peut être considérée comme un véritable **écosystème**.

2. Émissions gazeuses au cours de l'élevage des oiseaux

a) Origine des émissions gazeuses

La formation d'ammoniac (NH_3) dans les poulaillers est attribuée à la décomposition microbienne de l'acide urique dans la litière. Un grand nombre de moisissures et de bactéries intervenant dans ces processus enzymatiques sont identifiées sans qu'aucune d'entre elles ne soit capable de décomposer complètement le **substrat** initial en NH_3 . Quelques-unes décomposent l'acide urique en urée ou en d'autres intermédiaires. Par conséquent, au sein de la litière ou du **fumier de volaille**, des groupes de microorganismes en combinant leurs effets peuvent dégrader complètement l'acide urique en dioxyde de **carbone** (CO_2) et ammoniac (ITAVI, 1997b). L'ammoniac en solution dans la litière réagit avec l'eau pour former l'ammoniaque (ou hydroxyde d'ammonium), $\text{NH}_4^+ + \text{HO}^-$, solution fortement corrosive. L'ammoniac (NH_3) et l'ammonium (NH_4^+) forment donc un couple acide/base.

b) Fermentation de la litière

En surface, les processus enzymatiques en aérobiose impliquant des microorganismes variés au contact des déjections aboutissent à la production d'ammoniac, de dioxyde de **carbone** et d'eau. En profondeur, la **fermentation** aboutit à la formation de méthane (CH_4), de dioxyde de soufre (H_2S) et de dioxyde de **carbone**. La température de la litière influence la **fermentation** : en effet, c'est entre 20 et 40 °C, avec des teneurs en eau de 25 à 40 %, en présence de **matières organiques** en quantité suffisante, que les **fermentations** sont susceptibles d'être les plus intenses, jusqu'à présenter un danger consécutif aux dégagements d'ammoniac. Il n'est pas rare de voir des litières épaisses fermenter et atteindre une température voisine de 50 °C dans sa masse (ITAVI, 1997b).

c) Nature et quantification des émissions gazeuses

Gac *et al.* (2007) ont tenté d'établir un inventaire détaillé des émissions de méthane, protoxyde d'**azote** (N_2O) et ammoniac issues des déjections animales en France. Une méthode basée sur le concept du bilan matière a été développée pour quantifier les émissions issues des élevages bovins, porcins et avicoles, en prenant en compte les pratiques d'élevage nationales. Une base de données Access® contenant des facteurs d'émissions spécifiques, des données statistiques et des compositions de déjections a été élaborée pour réaliser ce calcul.

Les émissions totales de méthane, protoxyde d'**azote** et ammoniac ont été estimées respectivement à 365,2 kt, 28,7 kt et 382 kt. Les déjections des **volailles** représentent 9 % des émissions totales de CH_4 , 6 % des émissions de N_2O et 15 % des émissions de NH_3 , avec des contributions différentes des sept catégories de **volailles** étudiées et des quatre postes d'émissions retenus (milieu extérieur, intérieur des bâtiments, zone de stockage, zone d'**épandage**). En détaillant les résultats obtenus pour l'élevage avicole, il apparaît que les types de production d'une part, et les postes d'émissions d'autre part, participent de manière différente aux émissions : les canards à rôtir contribuent à 32 % des émissions de CH_4 et le stockage des déjections à 62 % ; les émissions de N_2O sont principalement liées aux poules pondeuses d'œufs de consommation (40 %) et à l'**épandage** (50 %) ; les émissions de NH_3 proviennent pour 36 % de l'élevage de poulets de chair et pour 65 % du poste bâtiment.

Ces résultats dépendent des facteurs d'émissions utilisés, or l'étude bibliographique a mis en évidence un manque de données concernant les **volailles** dans la majorité des cas (hormis

l'ammoniac en bâtiment). En identifiant les secteurs les plus émetteurs, cela conduit à identifier quelques pistes de travail pour améliorer les connaissances sur les émissions gazeuses en élevage avicole.

(1) Ammoniac (NH₃)

Les concentrations en ammoniac mesurées dans les poulaillers vont de 9 à 54 ppmv (Kastner *et al.*, 2009). Lundin (1988 dans Elwinger et Svensson, 1996) a estimé que les pertes en ammoniac représentaient environ 40 % du taux d'**azote total** de la litière. Elles sont évaluées à 300 t/an pour les seuls élevages de poulet de chair (Gstafsson et Mårtensson, 1986 dans Elwinger et Svensson, 1996). En effet, chaque oiseau émettrait en moyenne 1,2 g NH₃/jour (Siefert *et al.*, 2004 dans Kastner *et al.*, 2009). L'ammoniac issu des poulaillers s'échappe dans l'environnement principalement avec l'air de la ventilation.

Pour estimer la production d'ammoniac par les **volailles**, différentes méthodes sont disponibles. Gates *et al.* (2008) en ont proposé une basée sur les données récemment publiées à partir de poulaillers de poulets de chair aux Etats-Unis d'Amérique. Cette méthode prenait en compte l'augmentation linéaire du taux d'émission avec l'âge du lot de **volailles** (depuis une valeur proche de zéro en début d'élevage jusqu'à un maximum à la fin de la bande, 28 à 65 jours plus tard), des temps improductifs représentés par les phases de décontamination des locaux pendant l'intervalle entre bandes et de l'état de la litière. En utilisant les données disponibles sur 2003 de l'USDA, cette catégorie d'élevages contribuerait à hauteur de 8,8 et 11,7 kt d'ammoniac pour la litière neuve et accumulée, respectivement, dans le seul état du Kentucky, contre 240 et 324 kt respectivement au niveau national. Une diminution de 27-47 % des taux d'émissions annuelles des poulaillers était prédite sous la condition de remplacer pour chaque bande l'utilisation de litière accumulée par de la litière neuve.

Hassouna *et al.* (2007) ont réalisé des mesures en continu de température et d'hygrométrie à l'intérieur comme à l'extérieur entre les 48^{ème} et 56^{ème} jours d'élevage chez 4 lots de dindonneaux (270 dindons/lot et 2 lots/salle) élevés sur litière de copeaux de bois. Les concentrations en NH₃, N₂O et H₂O ont été analysées au premier jour et au dernier jour de la période concernée. Les émissions d'ammoniac estimées pour chaque lot variaient entre 2,21 et 3,45 g NH₃/dindon.

En élevage de canards de Barbarie (*Cairina moschata*), les émissions d'ammoniac dans des bâtiments à ventilation statique (de type Louisiane) sont de 17,3 ± 1,1 mg/m³ d'air relevées au centre du bâtiment ; les débits d'ammoniac sont de 121.10³ ± 8.10³ mg de NH₃/h, soit 21,5 ± 1,8 mg de NH₃/h par canard soit l'équivalent de 37 g d'**azote**/canard. Le débit global de NH₃ sortant du bâtiment est relié de façon très nette au débit d'air, à l'âge et au poids de la bande d'anatidés, au débit de H₂S ainsi qu'aux paramètres d'ambiance dans et hors du bâtiment. Les émissions de gaz et d'odeurs les plus élevées ont été mesurées en période plutôt froide en fin d'élevage. Par rapport au scénario correspondant aux émissions les plus faibles (jeune âge, températures extérieures froides), le débit de NH₃ par animal était multiplié par 5,3 (Lubac *et al.*, 2005).

À l'intérieur des bâtiments d'élevage, différentes pratiques peuvent favoriser ou non les émissions d'ammoniac. En utilisant un dispositif doté d'une chambre dynamique et d'échantillonneurs à diffusion passive, Elwinger et Svensson (1996) ont mesuré les émissions d'ammoniac dans chacun des 24 enclos d'un poulailler expérimental contenant au total de 3600 poulets de chair sur litière. Deux expériences multifactorielles ont été conduites, au cours desquelles ont été testées les influences de la litière, du type d'abreuvoir et de la ration sur la production de NH₃. Ni la nature (copeaux de bois ou paille de blé) ni les quantités de **substrat** utilisées n'ont eu d'impact sur les émissions d'ammoniac. Les pertes en **azote** du poulailler étaient d'environ 19 % de l'apport d'**azote**

total pendant une période de croissance de six semaines. L'abreuvement par pipettes comparée à l'utilisation d'abreuvoirs siphons se traduisait par une litière moins humide et de plus faibles émanations d'ammoniac. Les émissions d'ammoniac comme les pertes en **azote total** s'accroissaient significativement quand la teneur en protéines de la ration était relevée de 18 à 22 %. Par contre, une supplémentation de la ration avec un coccidiostatique employé comme facteur de croissance augmentait les émissions d'ammoniac mais pas les pertes en **azote**.

Nicholson *et al.* (2004) ont également enquêté sur les possibilités d'abattement de ce gaz en travaillant sur les méthodes de gestion des litières de **volaille** (pendant l'élevage et après le départ des oiseaux). Les mesures d'ammoniac portaient sur l'ensemble des opérations des cycles de gestion de en continu s litières de poulet de chair et de poules pondeuses (poulailler \Rightarrow manutention du **fumier** \Rightarrow stockage \Rightarrow **épandage** sur les terres). Les pertes en ammoniac enregistrées dans les élevages de poulets de sur paille en hiver (en moyenne 2,0 g NH₃/h/500 kg de poids vif) étaient supérieures à celles constatées sur litière de copeaux de bois (moyenne 1,0 g NH₃/h/500 kg de poids vif) (Nicholson *et al.*, 2004). *A contrario*, aucune différence n'était mise en évidence au cours des opérations de manutention, stockage et **épandage** des différents types de **fumier** évalués.

Dans l'élevage des pondeuses, les pertes en ammoniac (moyenne 3,3 g NH₃/h/500 kg de poids vif) avec un système de **curage** hebdomadaire par chaîne s'élevaient à plus du double de celles constatées avec un ramassage quotidien (moyenne 1,3 g NH₃/h/500 kg de poids vif) ; Un **curage** bihebdomadaire permettrait de réduire de 50 % les pertes en ammoniac par rapport à un seul traitement par semaine. Les pertes en ammoniac des poulaillers industriels sur fosses à lisier profonde (8,2 g NH₃/h/500 kg de poids vif) étaient plus élevées que pour les poulaillers équipés de chaînes de **curage** (2,7 g NH₃/h/500 kg de poids vif) ou ceux surélevés sur pilotis (1,4 g NH₃/h/500 kg de poids vif), mais il n'y avait pas de différence entre les **fumiers** des trois types de poulaillers pendant le reste des opérations de gestion des litières. Ces résultats montrent que certaines solutions, tant pratiques qu'économiques portant sur la gestion du **fumier** s'avèrent efficaces pour réduire les pertes en ammoniac pendant la phase d'élevage des **volailles**, mais sont sans effets mesurables sur les pertes en ammoniac pendant le stockage ou après l'**épandage** sur les terres.

En conclusion, pour limiter les émissions d'ammoniac, plusieurs mesures peuvent être mises en œuvre : utilisation des abreuvoirs pipettes, ajustement du taux de protéines de la ration, utilisation raisonnée des coccidiostatiques, aménagement et équipement du bâtiment, gestion et fréquence du **curage**. En revanche, les données sont contradictoires quant au choix du **substrat** à privilégier : pour Nicholson *et al.* (2004), les copeaux de bois semblent préférables, alors qu'aucune différence n'est notée pour Elwinger et Svensson (1996).

(2) Protoxyde d'azote

Dans le cadre de l'étude présenté dans le paragraphe précédent Hassouna *et al.* (2007) ont réalisé une série de mesures sur des bandes de dindonneaux élevés sur copeaux de bois. L'ensemble de ces données a permis d'estimer la quantité d'**azote** volatilisé sous forme polluante sur la 8^{ème} semaine d'élevage. Les émissions de protoxyde d'**azote** variaient entre 0,16 et 0,70 g N₂O/dindon. Pour cette 8^{ème} semaine d'élevage, la perte totale d'**azote** par volatilisation mesurée (NH₃ + N₂O) était comprise entre 9 et 15 % de l'**azote** excrété ce qui est inférieur aux valeurs proposées par le groupe CORPEN **volailles** en 1996 (40 % d'**azote** volatilisé) et de la Commission Européenne (35 \pm 35 %). Ces résultats plus faibles s'expliquent par le fait que ces estimations n'ont pas été réalisées sur l'ensemble de la période d'élevage, à partir de mesures en continu et ne tiennent pas compte de

l'**azote** émis sous forme de **diazote** (N_2) considérée comme non polluant. De plus, la valeur donnée par le CORPEN inclut les pertes relatives au stockage.

(3) Sulfure d'hydrogène

Lubac *et al.* (2005) ont quantifié et analysé les teneurs et émissions de gaz comme l'hydrogène sulfuré (H_2S) depuis les élevages de canards de Barbarie (protocole expérimental décrit en (1)). Le débit de H_2S moyen s'élevait à 3 580 mg/h, soit 0,67 mg/h par canard, pour une teneur moyenne en H_2S de $516 \pm 638 \mu g/m^3$ d'air sur 101 séries de mesures. Les émissions de gaz et d'odeurs les plus élevées ont été mesurées en période plutôt froide en fin de bande des canards. Par rapport au scénario correspondant aux émissions les plus faibles (jeune âge, températures extérieures froides), le débit d' H_2S par canard était multiplié par 5,6.

(4) Nuisances odorantes liées aux émissions gazeuses

Chez les canards de Barbarie, qui sont réputés être à l'origine des plus fortes nuisances en termes d'odeurs de la filière **volaille**, Lubac *et al.* (2005) ont quantifié et analysé les émissions correspondantes (protocole expérimental décrit en (1)). Le niveau moyen d'odeurs relevé sur 26 séries de mesures était de 4 050 u.o., avec un débit d'odeur de $59,3 \cdot 10^6 \pm 15,3 \cdot 10^6$ u.o./h soit $11\,400 \pm 3\,750$ u.o./canard/h. Ce dernier est lié de manière très significative au niveau d'odeurs ainsi qu'aux débits globaux d'air, de NH_3 et de H_2S . Une fois encore les émissions d'odeurs les plus fortes ont été mesurées en période plutôt froide et en fin de phase d'élevage. Par rapport au scénario correspondant aux émissions les plus faibles (jeune âge, températures extérieures froides), le débit d'odeurs était multiplié par 38.

En conclusion, des processus aérobies ou des **fermentations** dans la litière pendant l'élevage des animaux sont à l'origine de l'émission de plusieurs gaz en quantité importante (notamment l'ammoniac, pour les processus aérobies). Ces gaz sont parfois à l'origine de lésions chez les oiseaux et les personnels travaillant dans les exploitations avicoles (voir F) et ils provoquent des nuisances odorantes aux environs des bâtiments d'élevage.

D. Gestion de la litière

La nature et les quantités de litière produites seront différentes suivant l'espèce élevée. Une litière homogène sera obtenue à partir d'un support assez fin qui se mélangera facilement du fait de l'activité des animaux. La paille broyée, les copeaux ou encore un mélange paille-copeaux sont préférables à la paille entière. En cas d'utilisation de copeaux, il sera nécessaire de veiller à la sciure, laquelle présente en trop grande quantité, a tendance à conserver l'humidité absorbée et à favoriser la formation de croûtes en surface.

La litière demande un entretien soigneux de la part de l'éleveur :

- ventilation et chauffage suffisant pour maintenir la litière sèche, en particulier en fin de lot,
- utilisation de produits limitant la production d'ammoniac (**superphosphate** par exemple),
- enlèvement des croûtes autour du matériel d'élevage et notamment des abreuvoirs,
- rajout régulier, si nécessaire, de litière, surtout dans le cas de l'élevage de dindes (*Meleagris gallopavo*), car une bonne litière doit être souple et sèche.

Pour limiter la production d'ammoniac, l'ITAVI (2001a) recommande d'éviter de remuer les litières à partir de 25 jours d'élevage, afin de limiter l'activité de la microflore aérobie ; d'épandre, environ deux fois par semaine, une fine couche de nouvelle litière. Il n'y a alors plus ou très peu de NH₃ produit, faute de déjections en contact avec l'air. Le confort thermique des animaux peut de plus s'en trouver amélioré.

Les quantités de litière nécessaires peuvent varier suivant la saison, la nature du sol du bâtiment et la capacité de l'éleveur à bien maîtriser la ventilation de son bâtiment (ITAVI, 1997a).

Les recommandations concernant la litière en fonction de l'espèce sont présentées dans le **tableau 1**.

Tableau 1 : principales recommandations concernant la litière. ITAVI, 1997a ; Jacquet, 2007.

	Poulets (<i>Gallus gallus domesticus</i>)	Dindes (<i>Meleagris gallopavo</i>)
Nature	Paille de blé (broyage recommandé)	Copeaux de bois blanc non traité ou mélange paille-copeaux
Épaisseur	6 à 15 cm selon la saison et les auteurs	10 à 20 cm
Quantité	3 à 5 kg/m ² au départ pas de rajout en cours de bande	7 à 8 kg/m ² au départ 4 à 6 kg/m ² à rajouter en cours de bande

1. Traitements chimiques de la litière

Le contrôle chimique de la production d'ammoniac s'effectue par une inhibition de la croissance des micro-organismes qui décomposent l'acide urique ou par neutralisation de l'ammoniac relâché. Maintenir la litière à un pH faible de 6 (dans le cas des produits acidifiants comme l'alun, le sulfate d'aluminium, le mélange acide sulfurique/argile) inhibe la croissance des bactéries uricolytiques et augmente cette capacité de maintenir l'ammoniac à une faible concentration dans le bâtiment.

Le **superphosphate** et l'acide phosphorique ont été étudiés comme inhibiteurs de la croissance microbienne. Ces produits présentent l'avantage d'être peu chers et facilement disponibles. Le **superphosphate** est le produit le plus utilisé dans les élevages. Il a une action asséchante sur la litière. L'utilisation bihebdomadaire aux doses de 100 à 200 mg/m² s'avère intéressante. Ce produit ne demeure actif que pendant 5 jours environ. L'acide phosphorique a la capacité de réduire la production d'ammoniac d'un facteur de quatre par son action acidifiante.

La chaux, agent alcalin, a un effet bactéricide et bloque par son pH de 9 à 11 la **fermentation** (ITAVI, 1997b).

Le **bisulfate de sodium** (nom déposé PLT) est largement utilisé dans la péninsule du Delmarva (Etats-Unis d'Amérique) comme **amendement** de la litière de **volaille** pour supprimer les émissions d'ammoniac à l'intérieur du poulailler. Ce produit chimique est habituellement utilisé à un taux de 25 kg/100 m² pour chaque bande de **volailles** (Guo *et al.*, 2009a). Pope et Cherry (2000 dans Guo *et al.*, 2009a) ont démontré que l'**amendement** de PLT réduisait le pH et le nombre de bactéries totales de la litière, mais n'agit pas ni sur le taux humidité de la litière ni sur le taux d'**azote**.

2. Inoculation des litières avec des flores microbiennes

Guinebert et Pénaud (2005) ont évalué l'intérêt de l'apport régulier directement sur la litière d'une flore spécifique (BACTIVORND, inoculum constitué de souches de *Bacillus subtilis* sélectionnées

en fonction de leur aptitude à se multiplier et à dégrader la litière selon des critères métaboliques définis) dans cinq poulaillers de dindes. Celle-ci serait à même d'orienter le développement microbien et de modifier les processus de dégradation de la **matière organique**, sous son influence pour aboutir à une maturation bénéfique. La compétition bactérienne entretenue par ces apports entraînait la réduction drastique des entérobactéries et des coliformes dans la litière.

Ce travail permet aux auteurs de conclure sur les perspectives intéressantes apportées par le contrôle microbiologique de la litière pour répondre aux exigences de protection de l'environnement et du bien être animal.

De la même façon, l'objectif d'Allain et Aubert (2009) était de mesurer les effets de l'ensemencement d'une litière de poulets de chair en début de bande par un complexe de microorganismes en termes de pertes gazeuses, de **compostage** et d'assainissement. Les résultats obtenus montrent une réduction de plus de 80 % des pertes d'**azote** sous forme ammoniacale en bâtiment, un bon assainissement, et un bon **compostage** (augmentation de 40 % de l'**azote** organique). Le produit final obtenu lors du **compostage** sans retournement d'**andain** correspond à la norme NF U44-051 des **amendements** organiques, il est donc commercialisable.

L'inoculation de la litière au cours de l'élevage des animaux permet une réduction des pertes ammoniacales, ainsi qu'une diminution de la proportion d'**azote** lessivable présente dans les **fumiers** maturés. Les nuisances liées à l'**épandage** (odeurs notamment) sont limitées avec cette pratique. Enfin, l'inoculation permet de réduire les risques de contamination pour les animaux liés à la forte concentration en entérobactéries des litières non traitées, ainsi que par les microorganismes potentiellement pathogènes présents dans ces milieux.

E. Modifications des litières : causes

1. Ambiance

Un lot de 20 000 poulets produit environ 40 tonnes de **fientes** soit 30 tonnes d'eau et rejette 36 tonnes d'eau par le phénomène de la respiration. Ces importantes quantités d'eau sont à évacuer du bâtiment, d'où l'importance de la maîtrise de l'ambiance à l'intérieur de celui-ci. En effet, une mauvaise gestion de l'ambiance aboutira à une humidification importante de la litière avec des conséquences au niveau du confort des animaux et de la production d'ammoniac.

a) Ventilation

La ventilation a pour objectif d'assurer le renouvellement de l'air, et donc l'évacuation de l'humidité ambiante, permettant ainsi à la litière de rester sèche (moins de 20 % d'humidité). Cependant, les mouvements d'air sont susceptibles d'avoir une influence sur le confort des animaux en agissant sur les échanges thermiques entre le sol, l'air et l'animal et peuvent être à l'origine de diarrhées chez les jeunes.

Tout ce qui va perturber l'élimination de l'eau contribuera à l'humidification de la litière et à sa détérioration, avec toutes les conséquences négatives aussi bien sur l'ambiance que sur les animaux (ITAVI, 1997a).

La ventilation permet également de contrôler le taux d'ammoniac dans le bâtiment, qui doit idéalement rester inférieur à 15 à 20 ppm même si, pour cela, lorsque les températures extérieures sont froides, il faut chauffer le bâtiment (Jacquet, 2007).

b) Température

Une ambiance froide est préjudiciable à la qualité des litières. Tant que les températures des parois, comme de la toiture du bâtiment, ainsi que celle de la litière, sont plus faibles que la température des animaux, ces derniers perdent de la chaleur par **rayonnement**. Par ailleurs, les sources de chauffage et les parois latérales froides provoquent des circuits de **convection** difficilement supportés par les jeunes animaux. Les conséquences d'une température ambiante insuffisante sont les suivantes :

- apparition de **fientes** semi-liquides et brillantes,
- croûtage des litières le long des murs latéraux,
- répartition inégale des animaux, avec risque de dégradation locale de la litière,
- salissure du plumage des animaux (à cause des diarrhées).

L'augmentation de la température ambiante permet d'obtenir des litières plus sèches, car le pouvoir d'absorption de l'air est alors plus élevé (ITAVI, 1997a).

La température influence également l'activité des micro-organismes. Lorsque la température de la couche supérieure de la litière atteint 20 – 22 °C, l'activité microbienne aérobie s'accroît. À partir de 35 °C, un effet stérilisant apparaît et la production d'ammoniac décroît. Une élévation de la température augmente non seulement l'activité bactérienne et la production d'ammoniac, mais aussi les transferts de gaz provenant de l'air en contact avec la litière. Une faible augmentation de la température de 1 à 2 °C aura pour effet d'augmenter le niveau d'ammoniac dans les poulaillers (ITAVI, 1997b).

c) Hygrométrie

Il est préférable de maintenir l'**hygrométrie relative** de l'air ambiant entre 55 et 70 %, car :

- si elle est inférieure à 55 %, il peut y avoir des problèmes liés à la présence de poussière,
- si elle est supérieure à 70 %, il y a risque de forte humidification de la litière (ITAVI, 1997a).

Une litière trop humide par saturation de l'air en vapeur d'eau provoque un ralentissement des **fermentations**. Le taux d'humidité d'une litière à forte production d'ammoniac oscille entre 20 et 40 % d'**hygrométrie relative** (ITAVI, 1997b).

De nombreux systèmes ont été développés récemment afin de réduire l'impact des émissions atmosphériques sur l'environnement et de faciliter la gestion des déjections avicoles (**fumier** de **volailles** de chair et pondeuses). En ce qui concerne les bâtiments de **volailles** de chair, de simples mesures permettraient de réduire les émissions d'ammoniac, telles que l'épaisseur de la litière et l'amélioration des systèmes d'abreuvement (da Borso et Chiumenti, 1999).

Pour les bâtiments de pondeuses, plusieurs études sur le séchage ont démontré leur efficacité. Cependant, ces systèmes ne permettaient pas d'obtenir un taux de matière sèche du produit supérieur à 50 % et s'accompagnaient par ailleurs de nuisances olfactives et d'émissions d'ammoniac au cours du stockage et de l'**épandage**.

2. Sol

L'évolution d'une litière sur deux types de sols montre que le sol en terre battue présente un taux de matière sèche de 5 à 8 points supérieur à celui d'un sol bétonné. Les risques liés à un sol imperméable sont les suivants :

- humidification accrue des litières par un phénomène de condensation au niveau du sol,

- augmentation de la production d'ammoniac,
- fragilisation de la santé des animaux (ITAVI, 1997a).

3. Espèce animale et âge

Le comportement animal favorise parfois la production d'ammoniac. Un animal ayant une forte activité comme la pintade aère fortement la litière et favorise l'activité enzymatique aérobie. L'effet âge de l'animal intervient indirectement par rapport à la quantité de déjections présente dans la litière et aux paramètres physiques (température, **hygrométrie**) qui vont se modifier en cours d'élevage (ITAVI, 2001a).

4. Litière

a) Nature

En élevage de dinde, l'utilisation d'une litière à base de paille hachée conduit à un tassement de celle-ci sous le poids des animaux, avec pour conséquences une moindre absorption et une détérioration plus rapide (ITAVI, 1997a).

La production d'ammoniac provenant d'une nouvelle bande sur de la litière nouvelle sera lente dans un premier temps, mais après approximativement 20 jours, le pH augmente, facilitant le développement d'une des principales bactéries uricolytiques (*Bacillus pasteurii*) et donc la production de ce gaz (ITAVI, 2001a).

b) Épaisseur

Des épaisseurs faibles de litière (moins de 10 cm) seront assez vite saturées en humidité (ITAVI, 1997a).

c) Humidité

Si la litière est trop sèche (moins de 15 % d'humidité – base humide), elle pourra générer un excès de poussières en suspension, induire des mauvaises conditions d'élevage pour les oiseaux, et des problèmes de santé pour les travailleurs à la ferme. En effet, la poussière est le support de moisissures, bactéries et endotoxines potentiellement nocives pour les humains. Elle peut également causer des problèmes de santé, notamment chez les personnes asthmatiques.

À l'inverse, si la litière est trop humide, soit au-delà de 40 % d'humidité, se développent des conditions d'anaérobiose favorables à la production d'odeurs désagréables (Maurer *et al.*, 2009 ; McGahan *et al.*, 2008). C'est pourquoi les éleveurs doivent maintenir la litière à un taux d'humidité moyen, environ 25 à 30 % (Maurer *et al.*, 2009) en remplaçant les portions de litière humide ou en ajoutant en surface du **substrat** sec pendant l'élevage de la bande.

d) pH

Les **fermentations** ne peuvent se produire avec un maximum d'intensité qu'à un pH faiblement basique variant entre 7,8 et 8,8 et en présence d'une quantité suffisamment importante de déjections dans ou sur la litière (ITAVI, 1997b).

5. Densité des animaux

Des chargements excessifs des bâtiments rendent plus difficiles l'entretien et la bonne conservation de la litière. Les risques se situent à partir de 21 poulets/m² (ITAVI, 1997a). Une densité accrue favorise la production d'ammoniac en privilégiant l'activité des micro-organismes uricolithiques. Température et **hygrométrie** de la litière sont en effet plus élevées comme la quantité de déjections produites (ITAVI, 1997b, 2001).

6. Type de démarrage

Le démarrage en ambiance a été testé sur des dindes. Cette technique a permis d'améliorer les performances et de faire les constats suivants :

- meilleure répartition des animaux,
- meilleur état général des litières,
- meilleur emplumement,
- poids moyen supérieur,
- **indice de consommation** plus faible (ITAVI, 1997a).

7. Aménagement et équipement du bâtiment d'élevage

Un bon réglage des abreuvoirs permet d'éviter le gaspillage d'eau. Dans tous les cas où c'est possible, il est préférable d'utiliser des pipettes avec récupérateurs d'eau. D'autre part, il est essentiel que les abreuvoirs soient toujours réglés à une bonne hauteur, en adéquation avec la taille des oiseaux. Ces dispositifs permettent de garder plus sèche la surface de la litière et limitent la formation de croûtes (ITAVI, 1997a ; Jacquet, 2007).

Le bâtiment doit être aménagé pour éviter les entrées d'eau par le sol ou par les soubassements :

- drainage du sol du poulailler si nécessaire,
- soubassements étanches,
- isolation adéquate des murs et des sols pour prévenir la condensation,
- évacuation des eaux pluviales (gouttière ou caniveau).

L'éclairage naturel conduit à l'obtention de litières plus sèches que l'éclairage artificiel associé à une moindre activité des animaux (ITAVI, 1997a ; Jacquet, 2007).

De façon générale, les dispositifs permettant un séchage rapide des **fientes** limitent les dégagements d'ammoniac. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des poules pondeuses élevées en cages (ITAVI, 2001a).

8. Problèmes pathologiques

Diverses maladies infectieuses et non infectieuses peuvent augmenter la sévérité des brûlures, des pododermatites et des ampoules de bréchet ; toute maladie ou malformation squelettique qui réduit la mobilité de l'oiseau peut affecter son bien-être par l'augmentation du temps et de la surface de contact avec la litière (Jacquet, 2007). La dégradation des litières peut être mise en relation avec des troubles digestifs (diarrhées) dont les responsables peuvent être des agents infectieux d'origines diverses :

- le sol,
- les germes portés par la litière elle-même,
- les germes portés par les poussins,

- la contamination de l'eau de boisson,
- le bâtiment mal désinfecté, l'aliment,
- l'homme,
- d'autres vecteurs (insectes, rongeurs, ...).

Lors d'une infection microbienne ou virale, la paroi intestinale peut être atteinte avec pour conséquence des dérèglements digestifs qui se traduisent principalement par des **entérites**. Cette pathologie s'exprime généralement par une sécrétion accrue d'eau et d'électrolytes et par une nécrose de la muqueuse intestinale entraînant une excrétion dans la litière de fractions alimentaires non digérées. Ces diarrhées profuses contribuent à l'humidification excessive des litières et provoquent l'augmentation des dégagements d'ammoniac (ITAVI, 1997a, b).

9. Alimentation

Certaines matières premières de l'aliment tant en quantité qu'en qualité peuvent induire des modifications physiologiques des animaux avec pour conséquence un risque d'augmentation de l'humidité des litières. Ces facteurs nutritionnels agissent de la manière suivante (ITAVI, 1997a) :

- en augmentant la consommation en eau des animaux d'où des **fientes** plus liquides,
- en augmentant les rejets azotés,
- en augmentant la teneur en eau des excréta,
- en réduisant la digestibilité des graisses alimentaires (apparition de litières grasses).

a) Quantité et qualité des protéines

Les excès de protéines dans l'aliment provoquent une augmentation anormale de l'**uricémie**, laquelle va entraîner des précipitations d'acide urique au niveau des reins ; l'excrétion rénale des animaux est alors fortement sollicitée. En réponse, les **volailles** augmentent leur consommation en eau, responsable d'une humidification accrue des litières.

L'incorporation de protéines de faible digestibilité ou l'excès d'acides aminés conduit à une excrétion importante d'**azote** (ITAVI, 1997a). Les brûlures des animaux (pattes, points d'appuis) tendent à augmenter lorsque le taux d'**azote** dans la litière excède 5,5 %. Par ailleurs, plus l'activité microbienne aérobie est intense dans la litière, plus il y a d'ammoniac produit, que l'on retrouve dans l'air respiré par les animaux.

La présence d'ions ammonium dans la litière contribue à générer un pH élevé corrosif qui prédispose à des problèmes de manutention, stockage et entreposage (Kelleher *et al.*, 2002).

Par ailleurs, Travel *et al.* (2005) ont montré qu'une réduction des apports alimentaires en **azote** chez le dindon en période de finition permettait de limiter les rejets azotés, sans pénaliser les performances des animaux.

b) Minéraux en excès

Des sels métalliques en très faibles quantités sont souvent incorporés à l'alimentation des **volailles** pour augmenter l'**efficacité alimentaire**, la production d'œufs, et pour prévenir les maladies. L'eau de boisson et le gaspillage de la nourriture par les oiseaux contribue également à la présence d'**éléments traces** dans la litière car ces sels métalliques ont un faible **coefficient d'utilisation digestive**. Les études montrent que lorsque du cuivre est incorporé dans l'aliment, sa concentration dans la litière est 5 à 6 fois plus élevée qu'en l'absence de supplémentation ; le rapport étant de 7 avec l'arsenic (Subramanian et Gupta, 2006).

Le cuivre et le fer sont ajoutés à l'aliment des **volailles** pour prévenir l'anémie, le sélénium est incorporé, quant à lui, comme antioxydant, le zinc et le manganèse pour assurer la qualité de la coquille d'œuf et la croissance des plumes (North et Bell, 1998 dans Gupta et Gardner, 2005).

Les excès de certains minéraux comme le potassium, le sodium et le chlore entraînent une surconsommation d'eau avec les mêmes conséquences que précédemment (ITAVI, 1997a).

Garet *et al.* (2003) ont montré qu'en réduisant les apports en cuivre et zinc des poulets de chair de 25 à 5 mg/kg et de 90 à 45 mg/kg, respectivement, cela ne modifiait pas les performances zootechniques et réduisait significativement le taux de cuivre et de zinc dans les **fientes**. De plus, l'utilisation de cuivre-méthionine n'avait pas d'effet sur le cuivre des excréments par rapport au $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, alors que le zinc-méthionine permet de diminuer la teneur en Zn des **fientes** par rapport à celle obtenue avec le $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

- Composés arsenicaux (Roxarsone)

La roxarsone, composé organo-arsenical (acide 3-nitro-4-hydroxyphénylarsonique) est largement employée dans la production de **volailles** à la fois pour contrôler les coccidies, que pour améliorer le gain moyen quotidien, l'**indice de consommation**, la qualité du plumage, augmenter la production d'œufs et la pigmentation de la peau et du plasma (Anderson, 1983, dans Brown *et al.*, 2005). Incorporée à la dose de 20 à 40 mg/kg, elle est excrétée dans les fèces sans modification dans le **fumier** et introduite dans l'environnement quand la litière est épandue sur les terres agricoles comme **engrais**. En 2000, plus de 8,2 milliards poulets de chair ont été élevés aux Etats-Unis d'Amérique (USDA, 2001 dans Bednar *et al.*, 2003). En utilisant une formule alimentaire classique, chaque oiseau excréterait environ 150 mg de roxarsone pendant les 7 semaines de croissance (Anderson et Chamblee, 2001 dans Brown *et al.*, 2005). Ce chiffre correspond donc à plus de 350 000 kg d'arsenic introduit dans l'environnement chaque année par l'**épandage des fumiers** d'origine avicole.

c) Phosphore et phytases

Dans les plantes, le **phosphore** est principalement présent au sein de molécules organiques telles que les phospholipides, phosphoprotéines et phosphoglucides. L'acide phytique (ou acide myo-inositol hexa-phosphorique) est le plus répandu des phosphoglucides. Il renferme six fonctions PO_4 impliquées dans différentes liaisons avec les cations. Dans les graines, il est présent sous forme de phytine, complexe peu soluble de sels de Ca^{2+} et de Mg^{2+} , et surtout de phytates mixtes de K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} . Les phytases sont les médiateurs de la déphosphorylation des phosphoesters (en particulier l'**acide phytique** des végétaux). Le **phosphore** en excès est un élément néfaste pour l'environnement et coûteux pour l'alimentation des **volailles**. Chez les poulets de chair, la teneur en **phosphore** des **fientes** dépend directement de celle de l'aliment. Le même type de relation est observé chez la dinde. Une réduction des apports de **phosphore** minéral dans l'aliment semble particulièrement réalisable en période de finition. D'autre part, la supplémentation avec des phytases microbiennes dans l'aliment diminue les rejets de **phosphore** chez les poulets de chair de 0,12 % pour une teneur moyenne de 1,04 % de **phosphore** dans les **fientes** sèches (Lescoat *et al.*, 2005). Les phytases incorporées aux aliments des **volailles** sont notamment les phytases fongiques d'*Aspergillus ficcum*, *A. niger* et *Peniophora lycii*, ou bactériennes, d'*Escherichia coli*, par exemple. La phytase issue d'*A. ficuum* est celle qui montre la plus forte activité de dégradation du **phosphore** phytique *in vitro* (Dao et Hoang, 2008). Les phytases sont souvent incorporées à hauteur de 500 à 1000 **unités phytase/kg** d'aliment (Sauveur, 1993).

d) Présence de fibres

En fonction de la nature des matières premières et des quantités de fibres présentes dans l'aliment, la composition des déjections sera modifiée.

Par exemple, chez les dindonneaux, Carré *et al.* (1994) ont étudié le **pouvoir collant** des **fientes** en fonction du type d'aliment. Plus l'aliment contenait de parois végétales ou d'« **eau retenue par les parois** », plus les **fientes** étaient sèches et paraissaient cohérentes, et plus leur **pouvoir collant** était faible. En effet, les parois végétales ne sont pas digérées par les oiseaux et conservent donc leurs propriétés physiques dans les excréta. Vis-à-vis de l'eau, elles agissent comme un buvard et réduisent l'eau libre dans les excréta. Ces derniers présenteront donc un aspect moins liquéfié, et un **pouvoir collant** plus faible.

Les parois végétales les plus hydratées se rencontrent chez les dicotylédones (probablement du fait de la présence de substances pectiques dans ces parois). On retiendra, par ordre décroissant de taux d'hydratation des parois : la luzerne, les tourteaux de tournesol, colza et soja, le corn gluten feed, le remoulage de blé et enfin le pois. Par rapport à ces dernières matières premières, les céréales usuelles comme le maïs et le blé se situent à des niveaux beaucoup plus faibles.

Enfin, le traitement technologique influence le niveau d'hydratation des parois. La **granulation** des aliments, notamment à forte température, réduit le pouvoir de rétention d'eau des parois végétales.

Les parois végétales n'étant pas digérées, conservent leurs propriétés dans les excréta et y diminuent la proportion d'eau libre. Pour un même niveau d'eau absorbée, on obtiendra (ITAVI, 1997a) : soit des **fientes** collantes, soit des **fientes** normales ou plus liquides.

e) Matières grasses

Les matières grasses d'origine animale, riches en acides gras saturés, sont en général mal utilisées par le poussin à cause d'une production de bile réduite. Leur incorporation en quantité importante est à l'origine de litières grasses ou croûtées (ITAVI, 1997a ; Jacquet, 2007).

f) PSNA

Les polysaccharides non-amylacés (PSNA) contenus dans certaines matières premières (orge et seigle) ont la propriété de créer un gel en présence d'eau, ce qui augmente la **viscosité** de l'aliment dans le tube digestif, et a pour effet d'augmenter la consommation d'eau de l'animal. Les **fientes** sont alors collantes et humides, d'où une détérioration de la litière et une baisse de la qualité des produits (carcasses sales) (ITAVI, 1997a).

F. Dégradation des litières : conséquences

En présence d'une litière dégradée, les animaux peuvent présenter une diminution de leurs performances zootechniques voire développer une pathologie.

La baisse du poids vif, les ampoules du bréchet, l'augmentation des frais vétérinaires et du taux de saisie sont autant d'éléments qui viennent grever le revenu de l'éleveur (ITAVI, 1997a). Une réduction de l'appétit et un retard de croissance chez les jeunes animaux sont par exemple observés dès l'exposition à une concentration de 50 ppm d'ammoniac (ITAVI, 1997b).

De plus, une litière de mauvaise qualité, mal préparée, constitue un foyer idéal pour divers agents pathogènes de toutes natures (virus, bactéries, champignons et autres parasites). Parmi les

protozoaires importants, une litière dégradée favorise le développement de coccidies qui peuvent être à l'origine *a minima* d'une diminution du poids vif chez l'adulte et d'une baisse de croissance chez le jeune.

a) Atteintes respiratoires

Une litière hachée trop finement (moins de 5 cm) et (ou) broyée à l'intérieur même du bâtiment d'élevage génère des poussières volatiles favorisant l'apparition de maladies respiratoires et vectrices de nombreux micro-organismes à tropismes variés.

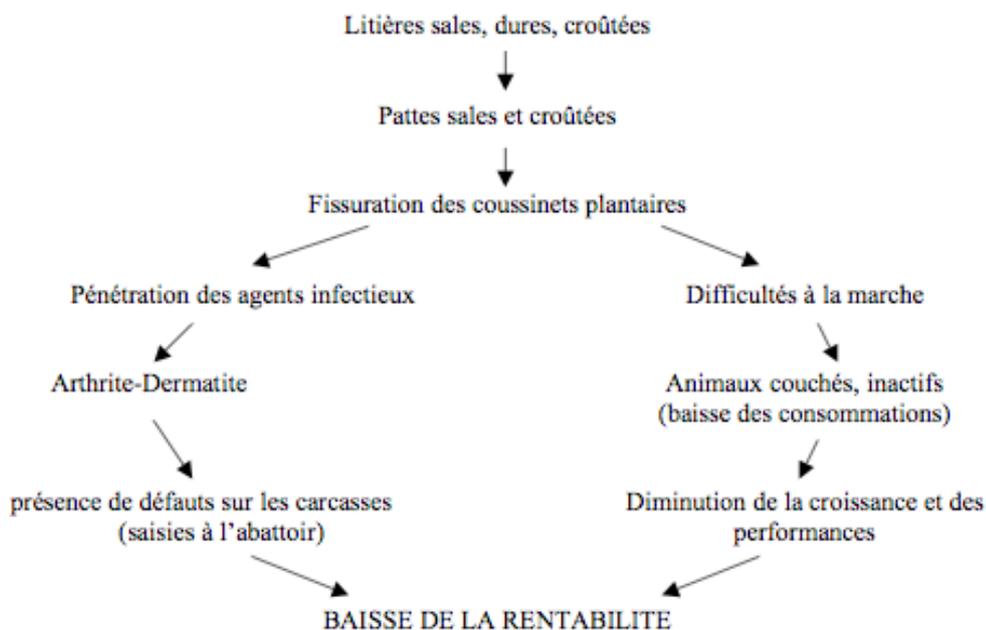
Une forte teneur en ammoniac peut avoir une influence directe sur la santé des animaux. Il s'agit même de la conséquence la plus importante liée à une litière de mauvaise qualité. Or la production de ce gaz est promue par une humidité excessive de la litière, et ce d'autant plus qu'elle est constituée de paille. L'ammoniac agit directement sur l'appareil respiratoire ou comme facteur prédisposant à une maladie respiratoire clinique. Il provoque en particulier une irritation des voies respiratoires supérieures et augmente la production de mucus. Il altère le fonctionnement de l'escalator mucociliaire de la trachée et diminue en conséquence la résistance aux infections respiratoires. Pour ces raisons, il est recommandé de ne pas dépasser 15 ppm d'ammoniac dans le bâtiment (ITAVI, 1997a, b).

b) Atteintes locomotrices

Une litière détériorée a des conséquences directes sur l'appareil locomoteur des animaux (boiteries) avec des impacts sur la croissance des animaux et la qualité des carcasses (augmentation du taux de saisie, diminution du **rendement** de découpe, lésions du bréchet) (ITAVI, 1997a, b).

Les conséquences de la dégradation des litières sont résumées dans la **figure 1**.

Figure 1 : conséquences de la dégradation des litières. ITAVI, 1997a.



Mirabito *et al.* (2007) ont décrit la cinétique d'apparition des pododermatites dans deux systèmes

d'élevage différents par la nature de la litière utilisée afin de mieux cibler les mesures correctives éventuelles. Les observations ont été réalisées dans dix lots de poulets des pays de la Loire durant le printemps 2006, cinq lots étant élevés sur litière de paille de blé et cinq lots sur litière de copeaux de bois. Chaque bande a fait l'objet de 4 visites durant la phase d'élevage au cours desquelles la présence de pododermatites était contrôlée chez 100 poulets. Dans les lots d'oiseaux élevés sur copeaux, lors de la première observation, 81 ± 33 % des pattes ne présentaient pas de lésions ou des lésions mineures et, de la 3^{ème} à la 5^{ème} semaine d'élevage, il n'y a pas eu d'évolution significative de ces fréquences. Dans les lots de poulets élevés sur paille, la majorité des animaux (84 ± 6 % en moyenne) présentaient des pattes avec des lésions modérées dès la 2^{ème} semaine d'élevage, fréquence qui diminuait ultérieurement. Même si le dispositif expérimental ne permet pas de conclure à un effet significatif du type de litière, les résultats obtenus montrent cependant l'effet potentiel de ce facteur sur la fréquence des pododermatites. Dans cette étude, il n'est cependant pas possible de dissocier l'effet propre du type de litière d'effets indirects comme la réduction de « l'humidité » de surface ou de possibles facteurs de confusion (épaisseur de litière moindre avec les copeaux) qui sont apparus comme des facteurs de risque dans une étude épidémiologique conduite en Suède (Ekstrand *et al.*, 1997 dans Mirabito *et al.*, 2007).

c) Atteintes oculaires

Lors de l'exposition prolongée à l'ammoniac, les oiseaux peuvent présenter des conjonctivites. Cette atteinte oculaire a pu être reproduite avec des taux de 100 à 200 ppm d'ammoniac pendant 5 semaines.

En conclusion, les premières victimes de la dégradation de la qualité de la litière sont les **volailles** qui sont élevées dessus. Dans ce cas l'agent nocif le plus fréquemment incriminé dans l'émergence des troubles est l'ammoniac. Il agit directement sur la santé des **volailles** mais aussi comme facteur favorisant l'apparition de maladies infectieuses par son action irritante.

G. Composition des fumiers

Plusieurs paramètres interviennent en cours d'élevage pour faire varier la composition du **fumier**, produit final obtenu après le départ de la bande : la teneur en matières sèches (MS) des déjections, la localisation des déjections dans le poulailler, le type d'alimentation, l'état sanitaire des animaux, le **substrat** de couchage utilisé et les méthodes de lutte contre les nuisibles (Turan, 2008 ; ITAVI, 1997a). Le **fumier** sera ensuite en grande majorité épandu sur les cultures. Il est donc indispensable de connaître sa composition avant de le disperser dans l'environnement.

1. Quantification des effluents produits en fonction du type de volaille

Plus de 12 millions de tonnes de **fumier** de **volaille** sont annuellement produites aux Etats-Unis d'Amérique (Sharpe *et al.*, 2005 dans Guo *et al.*, 2009b), soit plus d'un million de tonnes de plus qu'en 2001 (Gollehon *et al.*, 2001 dans Bernhart et Fasina, 2009). Ceci correspond à la production de 9,01 milliards de poulets de chair, 90,2 milliards d'œufs, 176 millions de poulets (hors poulets de chair) et de 273 millions de dindes (USDA, 2009).

Sur la péninsule de Delmarva (côte est des Etats-Unis d'Amérique), 700 000 tonnes de **fumier** sont produites annuellement (Delmarva Poultry Industry, 2008 dans Qiu et Guo, 2010). Dix Etats (Arkansas, Alabama, Mississippi, Caroline du Nord, Texas, Oklahoma, Delaware, Maryland et

Virginie) produisent les trois quarts de la production annuelle nationale de poulet de chair (Nyakatawa *et al.*, 2001c), et génèrent en conséquence 6 millions de tonnes de **fumier** de **volaille** annuellement.

Au Royaume-Uni, environ 4 millions de tonnes de **fumier** de **volaille** sont produites chaque année (Misselbrook, 2000 dans Nicholson *et al.*, 2004). En Irlande, 453 000 tonnes de litière de **volaille** sont produites chaque année représentant 217 110 tonnes d'excréments de **volaille** (Brogan *et al.* dans Henihan *et al.*, 2003 ; Anon, 2004 dans Rao *et al.*, 2007).

En Australie, Runge *et al.* (2007, dans Florin *et al.*, 2009) ont estimé à environ 1,6 milliard de m³/an le volume de litière produit.

Smith *et al.* (2000) ont cherché à estimer la quantité de **fumier** produite en fonction du type de **volaille**. Différents facteurs sont sources de variation dans la quantité et la qualité du **fumier** produit.

Tucker et Walker (1992, dans Smith *et al.*, 2000) les ont détaillés pour les poulets de chair :

- les erreurs dans l'estimation du pourcentage d'occupation,
- l'âge de l'abattage et son effet sur la rétention azotée,
- la composition de la ration,
- le gaspillage de nourriture,
- la mortalité,
- les facteurs affectant le taux d'humidité de la litière.

Pour les dindes, il faut ajouter le type génétique en plus de tous ces facteurs.

Pour les poules pondeuses, le type de logement (fosse profonde, un seul étage, poulailler sur pilotis, hangar) a un effet majeur sur le résultat ainsi que le système de ventilation.

Le **tableau 2** présente la quantité de **fientes** et de **fumier** produit, en fonction du type de **volaille** produite.

Tableau 2 : estimations du fumier produit en fonction du type de volaille. D'après Smith *et al.*, (2000), Ritz et Merka (2009). (On rappelle qu'un gramme par oiseau correspond à un kilogramme pour 1000 oiseaux).

Type de volaille	Durée du cycle d'élevage	Fientes produites	Substrat utilisé	Fumier produit
Poules pondeuses	Estimations pour 1 an	115 g/oiseau/j à 30 % MS ou 34,4 g/oiseau/j à 100 % MS	Oiseaux en cages	230 à 330 g/kg d'aliment consommé (75 % MS) ou 9 à 13,6 kg/oiseau/an
Poulettes de remplacement	140 jours (20 semaines)			3,6 kg/oiseau/cycle soit 25 g/oiseau/j
Poulets de chair	42 à 54 jours	29 g/oiseau/j	50 mm de litière (copeaux de bois ou paille hachée), 16 oiseaux/m ²	50 à 75 g/oiseau/j à 60 % MS (soit 30 à 45 g/oiseau/j à 100 % MS) ou 1,1 à 3,2 kg/oiseau/cycle
Poulets de chair - sélectionneurs	280 jours			20 kg/oiseau/cycle soit 71 g/oiseau/j
Dindes	140 jours (mâles) ou 120 jours (femelles)	136 g/oiseau/j (mâles) ou 64 g/oiseau/j (femelles) à 60 % MS	75 mm de litière (copeaux de bois), 5 oiseaux/m ²	159 g/oiseau/j à 60 % MS (mâles) ou 74 g/oiseau/j (femelles) à 60 % MS

2. Taux d'humidité

L'eau est le constituant majeur de la litière, laquelle se déshydrate rapidement par évaporation. Le produit final (le **fumier**) contient 20 à 40 % d'eau, en fonction du type de matériel absorbant, de la concentration en oiseaux, de l'équipement d'abreuvement et du système de ventilation (Ritz et Merka, 2009).

Pour les poulets de chair, le taux d'humidité est compris entre 3,5 % (pour une litière de copeaux de bois, Lima et Marshall, 2005b) et 70,2 % (pour une litière de paille de blé hachée, González-Matute et Rinker, 2006). On retrouve donc bien des valeurs correspondant aux caractéristiques d'absorption d'eau données précédemment. En moyenne, elle contient 30 % d'humidité (Chevalier *et al.*, 2005).

Pour les dindes, les variations du taux d'humidité sont moins importantes : il est compris entre 8,6 % (litière de copeaux de cèdre, Lima et Marshall, 2005a) et 16,3 % (litière de copeaux de pin, Pengthamkeerati *et al.*, 2005).

Pour les différents **substrats** utilisés comme litière, les taux d'humidité les plus faibles sont obtenus pour la sciure (13,6 à 15,0 %, Zhu et Lee, 2005) puis les copeaux de bois (8,6 % pour les copeaux de cèdre, Lima et Marshall, 2005a, à 48,7 % pour les copeaux de pin, Guerra-Rodríguez *et al.*, 2001). Les coques de riz donnent des litières moyennement humides (23,6 %, Pote *et al.*, 2009). Les litières à base de paille ont les taux d'humidité les plus élevés (70,2 %, González-Matute et Rinker, 2006).

3. Concentration en macroéléments

Omeira *et al.* (2006) ont comparé les propriétés microbiologiques et chimiques (pH, **conductivité électrique**, concentrations en **carbone**, **azote**, **phosphore**, potassium, cadmium et zinc) des **fumiers** produits par les poules pondeuses et les poulets de chair élevés dans des systèmes de production intensive ou en plein air. En systèmes intensifs, le **fumier** était plus riche en **azote** que dans les élevages plein air. Le **phosphore total**, à l'inverse du potassium total était le plus faible dans le **fumier** de poulets de chair élevés en plein air *versus* de manière intensive.

Pour tous les **nutriments** (macroéléments et **éléments traces**), leur concentration s'exprime soit en pourcentage de la matière sèche, soit en gramme d'élément par kilogramme de litière.

a) Carbone²

Le **tableau 3** présente le taux de **carbone** dans le **fumier** en fonction du type de **volaille**. Le **fumier** des poulets de chair est moins riche en **carbone** que celui des poulettes (Tiquia et Tam, 2002). Il n'y a pas de différence significative entre les taux de **carbone** du **fumier** pour des poulets de chair élevés sur paille de blé ou sur copeaux de bois (Elwinger et Svensson, 1996). Le **fumier** de dinde est plus riche en **carbone** que le **fumier** de pondeuses. Le **fumier** de poulets de chair est celui qui montre la plus grande variabilité dans le taux de **carbone**.

Tableau 3 : taux de carbone des fumiers en fonction du type de volaille.

Type de volaille	Carbone (% MS)	Carbone (g/kg)
Poulets de chair	10,2 (Dávalos <i>et al.</i> , 2002) à 52,1 (Charest et Beauchamp, 2002)	250 (Franzluebbers <i>et al.</i> , 2007) à 491,6 (Tiquia et Tam, 2002)
Poulettes		488 à 492 (Tiquia et Tam, 2002)
Poules pondeuses	25,4 à 25,5 (Omeira <i>et al.</i> , 2006)	
Dindes	34,9 (Lima et Marshall, 2005a) à 45,9 (Kim <i>et al.</i> , 2009)	161 (Pengthamkeerati <i>et al.</i> , 2005, 2006) à 356 (Motavalli <i>et al.</i> , 2003b)
Canards		327,8 (Faridullah <i>et al.</i> , 2009)

b) Azote³

La teneur importante en **azote** dans le **fumier** de poulet par rapport aux **fumiers** d'autres animaux de rente est due à l'excrétion combinée de l'urine et des fèces chez les **volailles**. L'excrétion urinaire d'**azote** contribue à environ 70 % de l'**azote total** et les 30 % restants proviennent des

² Voir également le Cycle du Carbone en Annexe 2.

³ Voir également le Cycle de l'Azote en Annexe 3.

matières fécales. L'acide urique représente 88 % de l'**azote** urinaire (Krogdahl et Dalsgard, 1981 dans Bujoczek *et al.*, 2000), ce qui correspond à 62 % environ de l'**azote total**.

Bastianelli *et al.* (2007) a utilisé la spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) pour la mesure des composés azotés des **fumiers**. Les calibrations obtenues ont servi à l'analyse de 245 échantillons prélevés dans 18 élevages (poulets et dindes), permettant l'étude des facteurs de variation de la composition des **fumiers**. L'espèce élevée avait un effet important sur les résultats, avec notamment des composés azotés significativement plus élevés dans les **fumiers** de dindes. Les **fumiers** de poulets certifiés avaient des teneurs en **azote total**, acide urique et **azote** protéique supérieures à ceux des poulets standard et label. La zone de prélèvement était également importante avec des différences significatives entre les zones abreuvoir, mangeoire et dortoir. Il est donc essentiel de faire des prélèvements dans plusieurs zones pour avoir procédé à une estimation non biaisée sur l'ensemble du bâtiment.

Le **fumier** de poules pondeuses en conditions intensives est plus riche en **azote** que celui des poules à **parcours libre** (Omeira *et al.*, 2006).

Le **tableau 4** présente les taux d'**azote total** dans les **fumiers** en fonction du type de **volaille** et les taux d'**azote** volatil ou non, lorsque cette information est disponible.

Tableau 4 : composition en azote des fumiers en fonction du type de volaille.

Type de volaille	Azote total	Azote non volatil (nitrate, nitrites)	Azote volatil (ammonium)
Poulets de chair	0,60 (Lima et Marshall, 2005b) à 5,60 % (Zhu et Lee, 2005) ou 20,0 (Sistani <i>et al.</i> , 2008b) à 55,7 g/kg (Faridullah <i>et al.</i> , 2009)	1,04 (Sistani <i>et al.</i> , 2008b) à 15520 mg/kg (Guo <i>et al.</i> , 2009b)	4,46 (Sistani <i>et al.</i> , 2008b) à 10900 mg/kg (Tiquia et Tam, 2000)
Poulettes (Tiquia et Tam, 2002)	32,19 à 35,55 g/kg	0,16 à 0,38 g/kg	10,84 à 11,06 mg/kg
Poules pondeuses	2,40 (parcours libre , Omeira <i>et al.</i> , 2006) à 3,70 % (élevage intensif, Omeira <i>et al.</i> , 2006) ou 18 g/kg (Casey et Merka, 2009)		8,2 g/kg (Casey et Merka, 2009)
Dindes	1,12 à 4,82 % (Kim <i>et al.</i> , 2009) ou 17,5 (Pengthamkeerati <i>et al.</i> , 2005, 2006) à 37 g/kg (Motavalli <i>et al.</i> , 2003b)		0,1 à 0,8 % (Guinebert et Pénaud, 2005)
Canards	35,8 g/kg ou 900 kg/1000 oiseaux (Smith <i>et al.</i> , 2000)		

c) Phosphore⁴

Le **tableau 5** présente les taux de **phosphore total** et soluble (lorsque cette information est disponible) dans les **fumiers** en fonction des différents types de **volailles**. Le **fumier** de dinde est plus riche en **phosphore** que le **fumier** de poulet de chair ou de poule pondeuse.

Tableau 5 : composition en phosphore des fumiers en fonction du type de volaille.

Type de volaille	Phosphore total	Phosphore soluble (phosphate)
Poulets de chair	0,6 (Omeira <i>et al.</i> , 2006) à 1,91 % (Haggard <i>et al.</i> , 2005) ou 0,026 (Charest et Beauchamp, 2002) à 28,1 g/kg (Hammac II, 2007)	11,185 (Charest et Beauchamp, 2002) à 4414 mg/kg (Hammac II, 2007)
Poulettes	13,01 à 13,86 g/kg (Tiquia et Tam, 2002)	
Poules pondeuses	0,60 % (Omeira <i>et al.</i> , 2006)	
Dindes	1,94 à 2,26 % (Lima et Marshall, 2005a)	27 g/kg (ITAVI, 1997a)
Canards	22,9g/kg (Faridullah <i>et al.</i> , 2009)	

En élevage de dindes, le taux de **phosphore** ne varie pas significativement selon les substrats utilisés (Aubert et Gadais, 2005).

Un des risques principaux pour l'environnement de la production de **volaille** est le déséquilibre en **azote** et **phosphore** disponibles pour les plantes dans le **fumier** destiné à être épandu. En effet, la concentration de ces deux **nutriments** dans la litière de **volaille** n'est pas strictement proportionnelle aux besoins des plantes (Szogi et Vanotti, 2009). Lorsque le **fumier** de **volaille** est épandu sur les terres cultivées sur la base des besoins en **azote**, un excès de **phosphore** est de fait appliqué, à cause du faible ratio N/P (2/1) du **fumier** d'origine avicole, ce qui conduit à son accumulation dans le sol (Szogi et Vanotti, 2009 ; Allen *et al.*, 2006). Cet élément peut alors être lessivé sous forme de **phosphore soluble** dans le **ruissellement** et contribuer à l'**eutrophisation** des eaux de surface (Szogi et Vanotti, 2009).

d) Potassium

Le potassium est présent dans le **fumier** de **volaille** sous forme de sel inorganique. Le potassium dans le **fumier** est rapidement disponible dans la plupart des cas, mais peut être rapidement perdu par **lessivage** si la litière n'est pas **enfouie** (Ritz et Merka, 2009).

Le taux de potassium est souvent très élevé (atteint 4 à 6 % de la matière sèche) dans les litières à base de paille et faible (1,5 %) et dans celle composées de copeaux de bois (Abelha *et al.*, 2003). Le **tableau 6** représente le taux de potassium en fonction du type de **volaille**.

⁴ Voir également le Cycle du Phosphore en Annexe 4.

Tableau 6 : taux de potassium dans les fumiers en fonction du type de volaille.

Type de volaille	Potassium
Poulets de chair	1,3 (Guerra-Rodríguez <i>et al.</i> , 2001) à 5,30% (Omeira <i>et al.</i> , 2006) ou 10 (Franzluebbers <i>et al.</i> , 2007) à 125,7 g/kg (Haggard <i>et al.</i> , 2005)
Poulettes	14,91 à 15,49 g/kg (Tiquia et Tam, 2002)
Poules pondeuses	2,0 à 3,10 % (Omeira <i>et al.</i> , 2006)
Dindes	2,75 à 2,88 % (Lima et Marshall, 2005a)
Canards	33,0 g/kg (Faridullah <i>et al.</i> , 2009)

e) Hydrogène, oxygène, soufre

La composition élémentaire en hydrogène, oxygène et soufre est intéressante pour l'étude des performances de **combustion** de la litière (voir IV. B.). Le **tableau 7** présente ces différentes valeurs pour les **fumiers** de poulet de chair et de dinde. Il n'y a pas de différences significatives entre les teneurs en hydrogène, oxygène et soufre des **fumiers** de poulet de chair et de dinde.

Tableau 7 : composition en hydrogène, oxygène et soufre des fumiers de poulet de chair et de dinde.

Type de volaille	Hydrogène	Oxygène	Soufre
Poulets de chair	2,82 (Zhu et Lee, 2005) à 9,1 % (Dávalos <i>et al.</i> , 2002)	20,34 (Zhu et Lee, 2005) à 48,30 % (Priyadarsan <i>et al.</i> , 2005)	0,10 (Lima et Marshall, 2005b) à 1,20 % (Lima et Marshall, 2005a)
Dindes	6,12 % (Kim <i>et al.</i> , 2009)	41,93 % (Kim <i>et al.</i> , 2009)	0,61 à 0,66 % (Lima et Marshall, 2005a)

4. Concentration en éléments traces⁵

Les **fumiers** de **volailles** sont principalement composés d'eau et de **carbone**, avec des quantités plus faibles d'**azote**, de **phosphore** et d'éléments à l'état de traces tels le chlore, le calcium, le magnésium, le sodium, le manganèse, le fer, le cuivre, le zinc et l'arsenic (Kelleher *et al.*, 2002).

Le **tableau 8** présente la composition en **éléments traces** des **fumiers** de poulets de chair. Le **tableau 9** présente la composition en **éléments traces** des **fumiers** de poules pondeuses et le **tableau 10** celle des **fumiers** de canard.

Le **fumier** de poulets de chair est plus riche en chlore que celui de dinde. Il est plus riche en calcium et magnésium que le **fumier** de canard. Le **fumier** de poule pondeuse est plus riche en calcium que le **fumier** de canard, plus pauvre en cuivre et en manganèse.

⁵ Voir également le Cycle des Éléments Traces en Annexe 5.

Tableau 8 : composition en éléments traces des fumiers de poulet de chair.

Chlore	Calcium	Magnésium	Sodium	Cuivre
9,3 à 11,43 g/kg (Guo <i>et al.</i> , 2009b)	9 (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007) à 99,1 g/kg (Haggard <i>et al.</i> , 2005)	1,9 (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007) à 24,4 g/kg (Sistani <i>et al.</i> , 2003)	2,1 (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007) à 18,64 g/kg (Qiu et Guo, 2010)	47 (Charest et Beauchamp, 2002) à 2763 mg/kg (Sistani <i>et al.</i> , 2003)
Fer	Manganèse	Zinc	Arsenic	Cadmium
180 (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007) à 12400 mg/kg (Sistani <i>et al.</i> , 2008a)	183 (Tewolde <i>et al.</i> , 2009) à 2307 mg/kg (Sistani <i>et al.</i> , 2003)	148,3 (Priyadarsan <i>et al.</i> , 2005) à 1848 mg/kg (Sistani <i>et al.</i> , 2003)	0 à 100 mg/kg (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007)	< 1 (Charest et Beauchamp, 2002) à 50,4 mg/kg (Omeira <i>et al.</i> , 2006)
Cobalt	Nickel	Plomb	Chrome	Sélénium
< 2 mg/kg (Charest et Beauchamp, 2002)	< 10 (Charest et Beauchamp, 2002) à 24,3 mg/kg (sd108, fumier)	< 20 (Charest et Beauchamp, 2002) à 35 mg/kg (Gupta et Charles, 1999)	3,8 (Charest et Beauchamp, 2002) à <10 mg/kg (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007)	2 mg/kg (Qiu et Guo, 2010)
Aluminium		Bore	Molybdène	
180 à 900 mg/kg (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007)		< 100 mg/kg (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007)	< 10 mg/kg (Franzluebbbers <i>et al.</i> , 2007)	

Tableau 9 : composition en éléments traces des fumiers de poules pondeuses. D'après Dao et Zhang, 2007 ; Omeira *et al.*, 2006.

Chlore	Calcium	Cuivre	Fer
2,4 (+/- 0,2) g/kg	90,5 (+/- 1,1) g/kg	571 (+/- 32) mg/kg	1615 (+/- 41) mg/kg
Manganèse	Zinc	Arsenic	Cadmium
715 (+/- 17) mg/kg	193,0 (parcours libre) à 612 mg/kg (élevage intensif)	1,9 (+/- 0,1) mg/kg	7,2 (parcours libre) à 5,7 mg/kg (élevage intensif)

Tableau 10 : composition en éléments traces des fumiers de canards. D'après Faridullah *et al.*, 2009.

Calcium	Magnésium	Cuivre	Manganèse
1,72 g/kg	1,19 g/kg	106,6 mg/kg	460 mg/kg
Zinc	Nickel	Plomb	
426 mg/kg	20,6 mg/kg	35,1 mg/kg	

Les **fumiers** de pondeuses sont plus riches en zinc par rapport à ceux des poulets de chair. Le cadmium est plus concentré dans les **fumiers** des élevages plein air quel que soit le type de

production que dans les systèmes intensifs. La concentration en cadmium constitue *a priori* le paramètre le plus critique, à l'instar de la présence de staphylocoques pour l'environnement et la santé humaine (Omeira *et al.*, 2006). Les litières des élevages de poules pondeuses, sur la base des numérations de coliformes totaux, indicateurs de la pollution de l'eau, de leur richesse en **nutriments** d'intérêt et de leur concentration moyenne en cadmium sembleraient constituer les fertilisants organiques les plus intéressants et les plus sûrs pour l'**épandage** sur terres agricoles.

En conclusion, la litière de **volaille** répond à trois qualités principales : elle est isolante, absorbante et confortable. C'est un **écosystème** complexe qui évolue au cours de l'élevage des oiseaux. Ce processus dynamique s'accompagne notamment d'émissions gazeuses (ammoniac, protoxyde d'**azote**, méthane, sulfure d'hydrogène).

Divers facteurs peuvent modifier l'évolution de l'**écosystème** litière, et la dégradation de la litière, lorsqu'elle a lieu, a des répercussions sur l'économie de l'élevage, la santé des oiseaux et du personnel de la ferme.

Enfin, l'évolution de la litière aboutit à la formation d'un **fumier** à la fin de la bande, dont les caractéristiques méritent d'être connues pour optimiser l'utilisation et le recyclage du **fumier**.

II. ÉVACUATION, STOCKAGE ET TRANSFORMATIONS SIMPLES DES FUMIERS

A. Identification rapide du fumier par spectrométrie fluorescente à rayons X

Pendant longtemps, la variabilité intrinsèque de la composition du **fumier** a considérablement limité l'estimation la **disponibilité** des **nutriments** présents et la prédictibilité de la réponse des cultures à l'**épandage**, diminuant *de facto* l'intérêt de la litière de **volaille** comme **engrais** dans la production agricole. Les méthodes d'analyses actuelles ne conduisent pas à des analyses rapides et reproductibles pour de tels matériaux hétérogènes, qui sont nécessaires pour pouvoir calculer des taux d'**épandage** pertinents notamment. Soixante et onze échantillons de litière ont été collectés à travers les états de l'Arkansas, de l'Oklahoma, et du Maryland pour évaluer l'application de la spectrométrie fluorescente dispersive d'énergie à rayons X (Energy dispersive X-ray fluorescence, EDXRF) à des fins d'analyse et de sélection rapide et exacte de différents types de **fumiers** (Dao et Zhang, 2007). Les résultats du dosage du **phosphore total** obtenus par la méthode à l'acide phosphomolybdate-ascorbique et l'EDXRF étaient corrélés, avec une erreur quadratique moyenne de 1,4 g/kg entre les méthodes. Les résultats de l'EDXRF et d'émission spectrométrique atomique plasma couplée pour le **phosphore**, le soufre, le potassium, le calcium, le manganèse, le cuivre, le zinc et l'arsenic étaient aussi bien corrélés. Une différenciation effective des litières issues d'élevages de poules pondeuses ou de poulets de chair a été possible par cette méthode sur la base de leurs concentrations en calcium et en arsenic. Les résultats suggèrent que la méthode EDXRF en disque pressé est une alternative aux méthodes de chimie des solutions à cause de sa simplicité et de sa rapidité de mise en oeuvre.

B. Différentes pratiques d'évacuation du fumier hors du bâtiment d'élevage

De nombreuses variations existent dans les pratiques de gestion des **effluents** ; cependant, la plupart des poulaillers sont curés après 3 à 6 bandes élevées dans un même bâtiment aux Etats-Unis d'Amérique. Plus le nombre de bandes élevées sur la même litière croît, meilleure est sa valeur nutritionnelle pour les plantes, et les différences entre la zone « dortoir » et les autres zones dans le poulailler deviennent minimales après quatre bandes. En France, le **curage** complet du bâtiment est réalisé après chaque départ de lot (Ritz et Merka, 2009).

McGahan *et al.* (2008) ont étudié les différentes pratiques d'élevage concernant la gestion de la litière afin d'établir une charte des bonnes pratiques. En fonction du type d'élevage, les **fientes** aboutissent à du lisier, du **fumier** ou sont naturellement disséminées par les oiseaux dans les systèmes à **parcours libre**. La litière de **volaille** est souvent relativement sèche et donc assez facile à gérer car manipulable. Dans les vieux bâtiments, certains éleveurs évacuent et stockent la litière des zones souillées sous un hangar jusqu'au nettoyage complet du bâtiment (à la fin de la bande). Dans les systèmes d'élevage modernes, des courroies de transport évacuent le **fumier** hors du poulailler, entre deux bandes, vers un lieu de stockage ou d'enlèvement. Pour les élevages sur grillage ou sur caillebotis, les **fientes** accumulées sont enlevées totalement après que les oiseaux sont partis.

En fonction du type d'évacuation du **fumier**, les propriétés du produit obtenu en fin de bande changent. Sistani *et al.* (2003) ont comparé deux techniques d'élimination de la litière entre 2 bandes d'animaux : la première technique, le « decaking » ou **décomprimage** consiste à retirer

entre chaque bande le « **gâteau** », mélange de matériel souillé par les déjections et de nourriture gaspillée par les animaux ; la deuxième technique, le **curage**, consiste à retirer l'intégralité de la litière après 8 à 10 bandes d'animaux (durée d'élevage de 47 à 49 jours chacune). Contrairement à la litière, le **gâteau** mesure normalement 5-10 cm d'épaisseur et se forme en surface, avec une grande variabilité en fonction des poulaillers.

La récolte du **gâteau** s'effectue grâce à un outil spécialement conçu à cet effet (HousekeeperND), qui sépare la litière sèche (fines particules de copeaux de bois, aiguilles de pin ou coques d'arachides) du **gâteau** humide agrégé en blocs, et laisse retomber la partie sèche du **substrat** au sol. L'ajout de litière fraîche permet ensuite de compenser le volume enlevé lors du **décomprimage**.

Cette étude a permis de montrer que le **décomprimage** produisait significativement moins de déchets que le **curage**, et qu'approximativement 57 % de la litière étaient finalement recyclés dans le poulailler lors du **décomprimage** contre 0 % avec le **curage**. En revanche, les deux types de déchets produits ne sont pas rigoureusement identiques en termes de propriétés chimiques. Le **gâteau** est significativement plus humide que la litière (455 et 277 g d'eau/kg, respectivement) et contient des quantités significativement plus importantes de Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn et Zn que le **fumier**. En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre ces deux matériaux concernant l'**azote total**, l'**ammonium**, le **carbone total**, les **phosphores total** et soluble.

La récolte du **gâteau** ou de la litière peut également s'accompagner d'émissions gazeuses qu'il convient de limiter. Les composés volatils soufrés (VSCs) sont une classe majeure des espèces chimiques odorantes des installations d'élevage des animaux. Identifier et quantifier les VSCs dans l'air est un défi à cause de leur volatilité, leur réactivité et leurs faibles concentrations. Trabue *et al.* (2008) ont collecté de l'air avec un mini-absorbeur. L'air était séché en passant à travers un tube à chlorure de calcium. Des prélèvements ont été réalisés dans un poulailler industriel sur litière de coques de riz. Les absorbeurs étaient placés en surface de la litière, immédiatement après le retrait du **gâteau**. Le VSC odorant principal détecté dans la litière de **volaille** âgée était le trisulfure de diméthyle. Les autres VSCs dont la concentration dépassait les valeurs odorantes seuils étaient le méthane et le sulfure de diméthyle.

En conclusion, les pratiques d'évacuation de la litière hors du bâtiment d'élevage conditionnent le type de produit obtenu (**gâteau** ou **fumier**) et sa composition. L'évacuation de la litière s'accompagne d'émissions gazeuses (gaz soufrés), à l'origine de nuisances odorantes. En France, les élevages produisent du **fumier**, nous nous concentrerons donc surtout sur ce dernier dans la suite de l'exposé.

C. Stockage du fumier

1. Influence du taux d'humidité

En fin de bande, l'éleveur est amené à transporter la litière hors du bâtiment pour son stockage, son **épandage** ou sa transformation. Le chargement/déchargement dans les remorques agricoles sera plus ou moins facile selon les propriétés d'écoulement de la litière, lesquelles conditionnent la conception des nouveaux conteneurs de stockage et des systèmes de transport. Elles sont caractérisées par le calcul de l'**indice d'écoulement**. Le frottement contre une surface est aussi un paramètre critique dans la conception structurelle et la stabilité des silos. Des faibles valeurs de frottement ont pour conséquence des charges transférées plus importantes sur les murs de paroi du

silos. Bernhart et Fasina (2009) ont étudié l'influence du taux d'humidité de la litière sur les propriétés physiques du produit et ses propriétés d'écoulement. Ils ont également déterminé les caractéristiques de frottement contre une surface.

Les échantillons de litière à base de copeaux de bois utilisés pour cette étude contenaient entre 10 et 30 % d'humidité. Le **substrat** a été stocké pendant trois mois avant le début de l'expérimentation. La taille des particules était obtenue par un système numérique d'analyse d'image. Un pycnomètre a permis de déterminer le volume des particules et d'en déduire la **densité particulaire** (ρ_p). La **densité volumique** de tassement a été mesurée avec un automate : l'échantillon était tassé 500 fois à 300 tassements/min et le volume final a été mesuré à l'issue de l'opération.

La **densité** de la litière de **volaille** et son **indice d'écoulement** diminuaient quand le taux d'humidité augmentait, contrairement à son aptitude à être comprimée. Une litière de **volaille** plus humide s'écoule moins bien passant de « facilement écoulable » (**indice d'écoulement** de 6,4) pour un taux d'humidité de 10,3 % à « très adhésive » (non-écoulement, **indice d'écoulement** de 1,9) à un taux d'humidité de 30,9 %.

En conclusion, le taux d'humidité final de la litière va conditionner son aptitude à être manipulée et stockée à l'état de **fumier**. En effet, une litière humide (30,9 %) ne s'écoulera pas facilement et utilisera un volume plus important lors du stockage, alors qu'une litière relativement sèche (10,3 %) sera beaucoup plus facile à transporter.

2. Évolution biologique des fumiers au cours du stockage

a) Évolution de l'azote

Dans le **fumier** de **volaille** frais, 60 à 80 % de l'**azote** se trouvent sous forme organique (urée et protéines). En fonction des conditions environnementales, un pourcentage important de cet **azote** organique (40-90 %) peut être converti en ammoniac en l'espace d'un an. Lors de la **digestion anaérobie** de la litière de **volaille**, en présence d'ammonium exogène, la concentration de l'ammoniac endogène augmente considérablement. Alors que certains microorganismes de la microflore anaérobie peuvent utiliser les ions ammonium, leur concentration en excès inhibe la décomposition des composés organiques, la production d'acides gras volatils et la méthanogénèse (Kelleher *et al.*, 2002).

Différentes pratiques de stockage peuvent influencer les pertes d'ammoniac au cours du stockage. Pour étudier leurs effets, Rodhe et Karlsson (2002) ont stocké du **fumier** de poulet d'octobre à mai en deux piles séparées, une découverte et l'autre recouverte avec une couche de paille de 30 cm d'épaisseur. Les émissions d'ammoniac ont été mesurées sur cinq périodes distinctes pendant le stockage. La température de l'air ambiant et les températures de piles étaient enregistrées en continu. Les mesures de température prises dans les piles pendant le stockage indiquaient une forte activité biologique. Les températures les plus hautes étaient enregistrées dans la pile couverte avec de la paille. Les pertes cumulées en ammoniac représentaient 7 % de l'**azote total** dans la pile non couverte contre 10 % dans la pile protégée. Le bouchon de paille agissait comme une barrière vis-à-vis des précipitations, limitant ainsi le taux d'humidité du **fumier**.

De façon plus globale, Phillips *et al.* (1999) ont étudié différentes options pour abattre les émissions d'ammoniac des dépôts d'**effluents**. Une revue de la littérature disponible suivie par une réunion de consensus ont permis de lister un certain nombre de pistes. Ces modalités d'abattement

étaient classées en fonction du type de stockage. Les capitaux à investir, les coûts de fonctionnement mais aussi d'autres aspects comme le bien-être animal ont été inclus dans l'estimation des abattements. Les différentes solutions proposées ont ensuite été classées de 1 (très mauvaise) à 5 (très bonne).

Pour les zones de stockage d'**effluents**, les approches de réduction retenues comme étant les plus intéressantes et réalisables rapidement à moindre coût étaient, dans l'ordre :

- le remplacement du stockage par un traitement industriel du produit ou son **épandage** direct sur les terres,
- la modification de la composition des aliments pour **volailles**,
- la minimisation de l'aire de surface de stockage par la constitution de piles (**fumiers** solides),
- la couverture de ces piles par une bâche (**fumiers** solides).

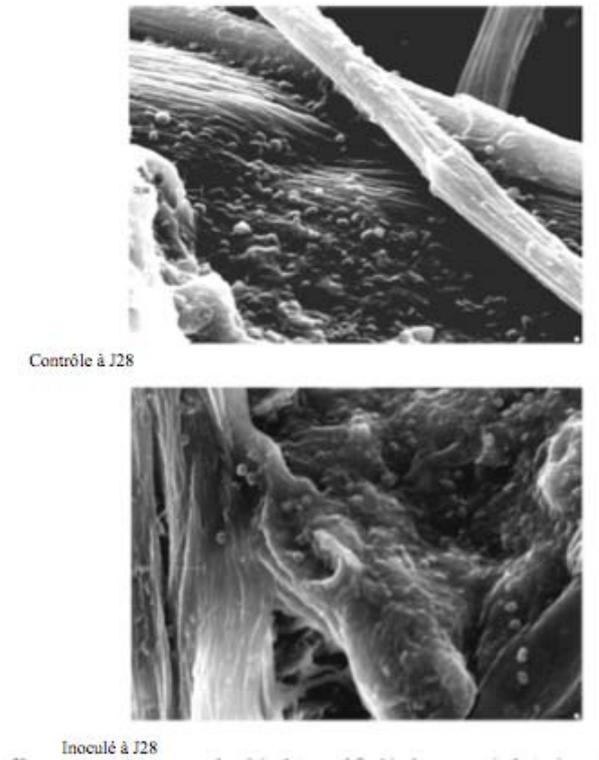
Le séchage du **fumier** permet également de diminuer la production d'ammoniac et en même temps de valoriser celui-ci comme **combustible** (pour les centrales électriques, notamment au Royaume-Uni).

En conclusion, au cours du stockage, une grande partie de l'**azote** organique est convertie en ammoniac, qui s'échappe dans l'atmosphère. Différentes stratégies sont possibles lors du stockage pour limiter les émissions d'ammoniac : minimiser la surface de contact entre le **fumier** et l'air en faisant des piles, et les couvrir avec une bâche (afin de créer des conditions anaérobies, peu favorables à la production d'ammoniac), sécher le **fumier**. En amont, la modification de la ration des animaux (voir I. E. 9.) permet d'éviter les émissions trop importantes d'ammoniac lors du stockage.

b) Inoculum bactérien et dégradation des plumes dans la litière

Une partie des populations microbiennes natives est susceptible de dégrader les déchets de **volaille**, mais le processus peut être activé en utilisant des bactéries dégradant spécifiquement les plumes. Des souches de *Bacillus licheniformis* et une espèce de *Streptomyces* isolée du plumage des oiseaux sauvages ont été mises en culture sur un milieu liquide de base afin d'inoculer des plumes placées dans les cuves de bioréaction (Ichida *et al.*, 2001). Les trois cuves témoins contenaient seulement le milieu de base ajouté aux plumes, à la litière ou à la paille. La température, la production d'ammoniac, de **carbone** et d'**azote** étaient enregistrées pendant quatre semaines. La microscopie électronique à balayage des échantillons de plumes montrait une dégradation plus importante de la structure kératinisée, et une formation plus précoce du film microbien sur les plumes inoculées que sur celles nonensemencées (**figure 2**). Les *B. licheniformis* et *Streptomyces* spp. thermophiles étaient présents en abondance tout au long de l'étude. Des bactéries entériques Gram négatives (*Salmonella*, *Escherichia coli*) trouvées à l'origine sur les résidus de plumes n'étaient pas retrouvées après 4 jours d'incubation. Les températures des cuves atteignaient 64 à 71 °C en 36 heures et se stabilisaient à 50 °C. Le 14^{ème} jour, le contenu des cuves était mélangé ce qui relançait l'activité bactérienne. Cette dernière culminait à 59 °C avant de chuter rapidement suite à l'épuisement du **carbone** disponible. Ainsi, l'inoculation par des bactéries kératinophiles des déchets de plumes pourrait-elle améliorer le **compostage** de grandes quantités de ces produits générés chaque année par les élevages de **volaille** et les établissements de transformation.

Figure 2 : vue en microscopie électronique à balayage. À J28, les plumes « témoin » nonensemencées présentaient des signes de dégradation mais conservaient une forme définie comme sur l'image du haut. Sur l'image du bas, les plumes inoculées sont difficilement identifiables visuellement. D'après Ichida *et al.*, 2001.



En conclusion, l'inoculation de la litière, lors du stockage (ou pendant l'élevage des **volailles**, voir I.) permet de développer une microflore apte à dégrader les composants de la litière (notamment les plumes), tout en limitant les émissions gazeuses. Cette inoculation contribue également à éliminer les bactéries pathogènes par l'élévation de la température au cœur du **fumier** pendant son stockage.

3. Stockage en piles et assainissement du fumier

Le **fumier** de **volaille** est classiquement stocké en piles de 1,2 m ou plus. Le sol doit être imperméable pour éviter tout risque de **ruissellement** et de pollution des eaux de surface. En effet, la litière est relativement légère et peut subir un **lessivage** sur les lieux de stockage provisoire. Griffiths (2007) recommande d'être particulièrement vigilant lors de l'entreposage du **fumier** de **volaille** pour éviter qu'il ne contamine les cours d'eau environnants ou ne soit dispersé hors des zones prévues à cet effet.

Les piles doivent également être à l'abri des intempéries pour éviter une augmentation importante du taux d'humidité du **fumier** (McGahan *et al.*, 2008). Le stockage a notamment pour objectif d'assainir le **fumier**, par l'échauffement qui s'y produit.

Kwak *et al.* (2005) ont ainsi évalué les effets d'un traitement en pile profonde de la litière de poulet de chair. La survie des entérobactéries a été évaluée en aérant ou non les piles profondes (Essai 1). L'effet de la durée (Essai 2) et de la fréquence (Essai 3) de l'aération sur le contrôle de l'échauffement de la litière de **volaille** a également été déterminé. L'impact de la température des

pires sur la survie des bactéries cibles et sur la composition chimique de la litière de **volaille** a été enregistré.

Dans l'essai 1, *E. coli*, *Salmonella* Enteritidis et *Shigella sonnei* ont été intentionnellement inoculées à raison de 10^3 bactéries par gramme de litière dans 0,4 tonnes de **fumier** et leur survie a été suivie en fonction du temps de stockage en pile du **fumier**.

Dans l'essai 2, la litière était aérée une fois par jour dès que la température maximale (62 °C) de la pile était atteinte et commençait à diminuer à la fin de la période de traitement.

Dans l'essai 3, la litière était aérée une ou deux fois par jour, à compter du jour suivant le pic de température et jusqu'à avoir atteint une température d'équilibre de 20 °C. Pendant le traitement en pile profonde de la litière, les bactéries pathogènes étaient éliminées entre le deuxième (*Shigella*) et le quatrième jour (*E. coli* et *Salmonella*) de stockage. Ce phénomène avait lieu non seulement à cause de la forte température générée, mais aussi à cause d'autres facteurs potentiels, comme le dégagement d'ammoniac et la compétition microbienne. L'aération résultait en une dissipation de la chaleur et donc une diminution de la température de la litière en pile profonde ; lors de l'aération, les entérobactéries pathogènes étaient détruites en 4 à 8 jours. La procédure optimale d'aération pour éviter un chauffage excessif de la litière empilée consistait à aérer une fois par jour jusqu'au pic de température au début du traitement en pile profonde et de poursuivre pendant 3 jours encore ou jusqu'à ce que la température ait décliné jusqu'à une valeur constante. Ces fréquence et durée d'aération n'altéraient pas la composition chimique de la litière de **volaille** stockée telle quelle.

Ces résultats suggèrent que la litière de **volaille** correctement empilée, avec ou sans aération, assure l'élimination des entérobactéries pathogènes en 8 jours.

Cette dernière affirmation est cependant à nuancer. En effet, Bush *et al.* (2007) ont testé la survie de *Salmonella* dans le **fumier** empilé sur une hauteur recommandée (2,13 m) ou sur une hauteur de 0,76 m. Des sacs de dialyse contenant le **fumier** de **volaille** et *Salmonella* Typhimurium ont été placés dans les piles. La température était enregistrée quotidiennement en utilisant des thermocouples reliés aux sacs d'échantillons, lesquels étaient récupérés après 21 jours. Une mesure de l'ammoniac était pratiquée à différents endroits dans les piles. Le contenu des sacs était mis en culture pour déterminer la viabilité des inoculas de salmonelles. Cet essai démontre une large variation de la température dans les piles ; ainsi, près de la surface, la température variait en fonction de la température ambiante. La concentration en ammoniac dans le **fumier** de **volaille** était plus élevée en haut de la pile de 2,13 m. *Salmonella* était éliminée dans 98,7 % des sites d'échantillonnage, avec une réduction d'au moins 5 log₁₀ là où elles étaient encore viables.

De même, Graham *et al.* (2009a) ont caractérisé la survie de souches antibiorésistantes d'entérocoques et de staphylocoques dans les piles de **fumier** de **volaille**. La température, l'humidité et le pH ont été mesurés à un mètre de profondeur dans le **fumier** pendant une période de 120 jours dans les piles de stockage de trois fermes conventionnelles de **volaille** de chair, tout comme les unités formant colonies d'*Enterococcus* spp. et de *Staphylococcus* spp. Des températures supérieures à 60 °C ont été enregistrées seulement par intermittence au cœur des piles de litière. Les entérocoques et les staphylocoques antibiorésistants, tout comme les gènes de résistance persistaient au-delà de la période de 120 jours d'étude. Ces deux dernières études indiquent que les pratiques de stockage classiques du **fumier** de **volaille** en piles sont insuffisantes pour éliminer les staphylocoques et les entérocoques antibiorésistants, qui peuvent être alors répandus dans l'environnement lors de l'**épandage** sur les terres.

- Antibiorésistance

Les isolats sélectionnés par Graham *et al.* (2009a) dans chaque échantillon de **fumier** (voir paragraphe précédent) ont été testés pour leur résistance à huit antibiotiques couramment

administrés dans l'aliment des **volailles**, tout comme pour la présence de gènes de résistance et d'éléments génétiques mobiles. Les gènes de résistance identifiés dans l'étude incluaient : *erm*(A), *erm*(B), *erm*(C), *msr*(A/B), *msr*(C) et *vat*(E).

En conclusion, le stockage en piles permet suivant les études, un assainissement complet ou partiel du **fumier** pour *Salmonella* Typhimurium, certains entérocoques et staphylocoques. Cet abattement est obtenu en 8 jours pour la majorité des entérobactéries, mais la survie de *S. Typhimurium* peut être supérieure à 21 jours, et celles de certains entérocoques et staphylocoques supérieure à 120 jours. L'**épandage** des **fumiers** pourrait en conséquence permettre la dispersion de ces bactéries dans l'environnement proche et affecter par voie de conséquence les populations humaines.

D. Compaction du fumier

L'utilisation de la litière a été historiquement limitée à quelques kilomètres autour du lieu de production en raison de sa faible **densité** rendant son transport à distance peu intéressant. Différentes techniques ont été mises au point pour augmenter cette **densité**.

La litière utilisée pour l'étude de Bernhart *et al.* (2010) était composée de copeaux de bois. L'expérimentation a été mise en œuvre sur du **fumier** dont le taux d'humidité était compris entre 19,8 % et 70,7 %. La **compaction** avait lieu dans un moule circulaire lubrifié avec de l'huile végétale pour limiter les forces de frottements entre la litière et le moule. Le moule était rempli avec la litière, pendant 60 secondes dès qu'une force constante était atteinte. La force nécessaire pour remplir le moule était déterminée, et la force pour rompre l'échantillon après 2 mois de stockage était également enregistrée.

Les résultats obtenus ont montré que la **densité** initiale après **compaction** de la litière de **volaille**, l'énergie nécessaire pour la **compaction** et la solidité du matériel densifié après 2 mois de stockage étaient significativement affectées par le taux d'humidité et la pression appliquée pendant la compression. Après 2 mois de stockage, la **densité** du matériel compacté dépendait seulement de la pression appliquée pendant la **compaction**. Cependant, les auteurs rapportent que, lorsque le taux d'humidité de la litière atteignait 60,5 %, l'énergie nécessaire (0,25 à 2,00 kJ/kg) pour compacter la litière par rapport à celle requise pour la transformer en **granulés** (voir F. pour la **granulation**) était réduite d'un facteur 9.

Les auteurs recommandent donc de compacter la litière en ajustant son taux d'humidité à 60,5 % et avec une pression de 5,0 MPa. La **compaction** permet de réduire efficacement le volume de **fumier**, et la conservation du produit obtenu qui dépend uniquement de la pression appliquée lors de la compression est bonne après deux mois de stockage.

E. Compostage du fumier

Le **compostage** correspond à la dégradation anaérobie des déchets organiques biodégradables. C'est un processus relativement rapide, qui prend classiquement 46 semaines pour obtenir un matériau final stabilisé. Le **compost** à maturité ne s'échauffe plus lors du retournement ; il possède une température inférieure ou égale à 30 °C et n'est pas phytotoxique. Pour évaluer la phytotoxicité du **compost**, de très nombreux tests sont disponibles. Les plus fiables sont les tests de germination. Plus un **compost** est mature et plus les **indices de germination** sont élevés (Kraeutler et Levasseur, 2001).

Le ratio C/N et l'**humidité relative** du **substrat** initial jouent un rôle primordial dans la réussite du **compostage**. Ainsi, le faible ratio C/N du **fumier** de poules pondeuses induit des pertes importantes sous forme d'ammoniac (Georgakakis et Krintas, 2000). D'après Ferguson et Ziegler (2004), le **compost** devrait être produit par un processus qui combine au départ des matériaux végétaux et animaux, avec un ratio C/N initial compris entre 25/1 et 40/1. L'excès d'humidité, s'il est supérieur à 75 % (Georgakakis et Krintas, 2000) inhibe le démarrage rapide du processus de **compostage**. Le taux d'humidité (ou le pourcentage de matière sèche) a une influence majeure sur le taux de décomposition et la tendance à la stabilisation, puisque la chaleur métabolique générée pendant le processus provoque l'évaporation de l'eau. Les facteurs qui contribuent à la perte d'humidité incluent l'évaporation, le **lessivage** et l'aération, naturelle ou forcée (Kelleher *et al.*, 2002). Un taux d'humidité de la matière brute initial compris entre 40 et 60 % est ainsi conseillé pour un **compostage** de qualité, bien que Fernandes *et al.* (1994 dans Kelleher *et al.*, 2002) aient réussi une telle opération sur du **fumier de volaille** mélangé avec de la **tourbe** dans une pile statique passive à des taux d'humidité initiale élevés (73-80 %).

1. Évolution biologique des fumiers au cours du compostage

a) Transformation de l'azote, de la matière organique et du phosphore

Une litière de poulet a été compostée en **piles à aération forcée** pour comprendre l'évolution de la composition du **substrat** et les pertes d'**azote** au cours du processus de **biodégradation** (Tiquia et Tam, 2000). Pendant le **compostage**, les propriétés chimiques (différentes fractions azotées, **matière organique**, **carbone** organique, ratio C/N), physiques et microbiennes de la litière de **volaille** ont été examinées. Les pertes cumulatives et les bilans massiques de l'**azote** et de la **matière organique** ont été également établis. L'évolution de la concentration d'**azote total** des piles correspondait à celle de l'**azote** organique, constituant azoté majeur d'un point de vue quantitatif. La concentration en ammonium diminuait de façon importante pendant les 35 premiers jours de **compostage** sans toutefois être compensée par un accroissement rapide de la concentration en nitrate et nitrite. Cette dernière, très basse à J_0 ($< 0,5$ g/kg), ne variait pas pendant les 35 premiers jours de **compostage**, suggérant que les pertes d'**azote** survenaient pendant le **compostage** du fait principalement de la volatilisation de l'ammoniac lorsque la température de la pile était haute et les valeurs de pH supérieures à 7. Le ratio C/N faible ($< 20/1$) contribuait également aux pertes azotées de la litière de **volaille**. La **matière organique** et le **carbone** organique total ont également décru pendant le processus de décomposition. Environ 42 kg de **carbone** organique étaient convertis en CO_2 . D'un autre côté, 18 kg d'**azote** étaient perdus pendant le **compostage**. Cela démontre que l'opération de **compostage** réduit la valeur de la litière de **volaille** comme **engrais** azoté. Cependant, la litière compostée contenait plus de **matière organique** humifiée (stabilisée) que la litière non compostée, ce qui pourrait améliorer sa valeur comme **conditionneur de sol**.

Pour le **phosphore**, de récentes études ont indiqué qu'il n'était pas stabilisé lors du **compostage** et que le **phosphore** en excès pouvait être libéré dans l'environnement quand la litière de **volaille** était appliquée sur les terres en se basant seulement sur les besoins en **azote** des plantes (voir III. A. 4. a) (2)) (Preusch *et al.*, 2004).

b) Émissions d'ammoniac

Les émissions d'ammoniac pendant le **compostage** de la litière de **volaille** représentent un impact significatif sur l'environnement. Elwell *et al.* (1998 dans Kelleher *et al.*, 2002) ont réalisé des études sur le **compostage** de la litière de **volaille** sans rien ajouter au **substrat** à traiter. Ils ont montré que même si du matériel trop humide peut entraver le démarrage du processus de **biodégradation**, l'évolution thermique du processus assèche le matériau et aboutit à un produit à texture fine qui contient moins de 20 % d'humidité et peut être ensaché et/ou vendu industriellement.

Kithome *et al.* (1999 dans Kelleher *et al.*, 2002) ont également mesuré la volatilisation d'ammoniac lors du **compostage** en laboratoire de la litière de **volaille** mais en testant le potentiel de différents additifs pour diminuer la perte de ce gaz. Différents **amendements** étaient ajoutés à la litière de **volaille**, incluant deux **zéolithes** naturelles, de l'argile, de la fibre de coco (mésocarpe de la noix de coco), du CaCl_2 , du CaSO_4 , du MgCl_2 , du MgSO_4 et du $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Le **compostage** durait de 49 à 56 jours et l'ammoniac volatilisé était piégé dans une solution d'acide sulfurique. Les matériaux compostés étaient pesés et analysés afin de déterminer leur taux d'humidité, les concentrations en **azote total** et ammonium. Les pertes d'ammoniac issu des litières non amendées représentaient de 47 à 62 % de l'**azote total** du **fumier**. L'adjonction en surface d'une couche de 38 % de **zéolithe** (avec 62 % de **fumier**) réduisait les pertes en ammoniac de 44 % alors que l'apport de 33 % de fibres de coco (avec 67 % de **fumier**) résultait en un abattement de 49 %. Composter le **fumier** de **volaille** (80 %) avec 20 % d'alun diminuait ces pertes de 28 %. L'ajout de **zéolithe**, de fibres de coco et d'alun produisait des **composts** riches en ammonium, représentant de 17 % à 53 % de l'**azote total**. L'adjonction de 20 % de CaCl_2 réduisait la volatilisation d'ammoniac, sans accroître les concentrations d'ammonium ou de nitrates. Les **composts** amendés avec 38 % de **zéolithe** ou 33 % de fibres de coco avaient des concentrations en **azote total** de 17 % et 31 %, respectivement.

En conclusion, les **amendements** de **zéolithe** et de fibre de coco représentent les techniques les plus efficaces pour diminuer les pertes en ammoniac pendant le **compostage** de la litière de **volaille**.

c) Émissions de Composés Organiques Volatils (COVs)

Les composés organiques volatils sont un large groupe de composés anthropogéniques (xénobiotiques) ou biogéniques avec des pressions de vapeur relativement élevées. Ils sont également caractérisés par leur faible solubilité dans l'eau. Ils constituent des polluants atmosphériques potentiels à cause de leurs propriétés malodorantes voire nocives. Une irritation des yeux et de la gorge, des lésions hépatiques ou nerveuses centrales peuvent survenir en cas d'exposition prolongée à ces composés. Ils peuvent également avoir des effets cancérigènes. De plus, ils contribuent potentiellement au réchauffement climatique, à la réduction stratosphérique de la couche d'ozone et à la formation d'ozone troposphérique. Leurs émissions sont importantes en début de **compostage**, jusqu'à $15\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ de COV pour le **compostage** de la litière seule pendant les trois premières semaines, puis leur production diminue progressivement jusqu'à des valeurs inférieures à $2000\ \text{mg}/\text{m}^3$ dès la 6^{ème} semaine de **compostage** (Turan *et al.*, 2009).

d) Evolution bactérienne : validation de l'hygiénisation des composts par la chaleur à 70°C pendant une heure

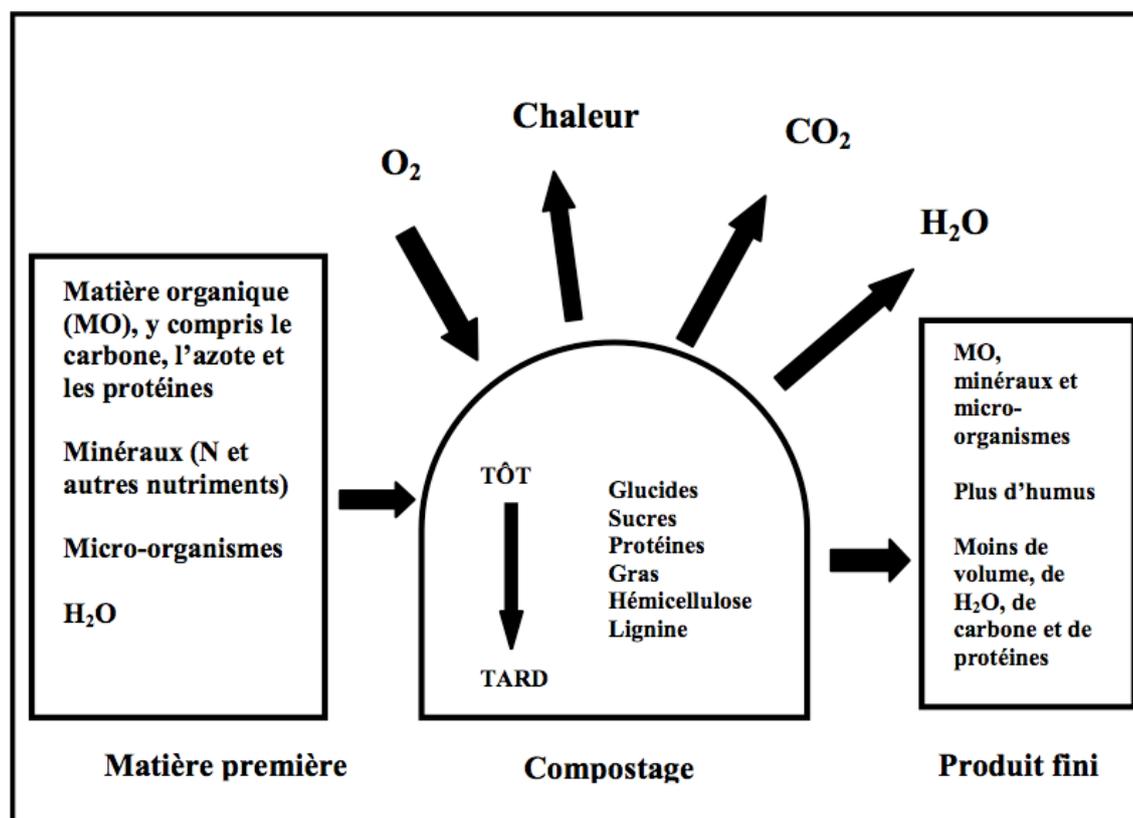
La maturation des piles de **compost**, qui atteint normalement des températures allant de 55 à 65 °C, est généralement considérée comme efficace pour contrôler les risques biologiques et se conformer aux standards sanitaires relatifs aux **composts** stipulés à la fois par l'Union Européenne et les Etats-Unis d'Amérique. La législation de l'Union Européenne encadrant la sécurité des dangers biologiques exige que les produits compostés dérivés de sources animales atteignent 70 °C, soit pendant au moins 3 heures lors de la phase de maturation du **compost**, soit pendant 1 heure si on utilise un traitement thermique à 70 °C, avant l'**épandage** sur les terres. L'établissement de la limite inférieure de létalité thermique des principaux agents pathogènes à 70 °C pendant 1 h pour assurer la biosécurité des produits compostés de déchets animaux (c'est-à-dire les formulations en **granulés**) n'est pas véritablement étayé par des tests de validation spécifiques. Ces derniers comprennent une étape de stérilisation (souvent par autoclave), suivie par l'inoculation d'espèces bactériennes sélectionnées avant exposition à 70 °C pendant 1 h et détermination de l'effet léthal. Les formulations des **composts** sous forme de **granulés** ne peuvent être stérilisées sous atmosphère humide (autoclave) sous peine de voir dégrader la structure et donc l'intégrité des échantillons. Moore *et al.* (2009) ont donc décrit une méthode de laboratoire utilisant une étape de stérilisation par irradiation au ⁶⁰Co appliquée à :

- des échantillons de **compost** extraits de piles de **compost** et,
- des produits en **granulés** dérivés de litières compostées.

La létalité thermique d'un processus de traitement selon un couple (temps/température soit 70 °C pendant 1 h est déterminée pour l'échantillon irradié après inoculation par un des 10 microorganismes potentiellement à l'origine d'intoxications alimentaires (*Campylobacter*, *Escherichia*, *Listeria*, *Salmonella*, *Yersinia*), et fréquemment détectées dans les **effluents** d'élevages de **volailles**. Ce test sur les échantillons de **compost** peut être utile pour l'inspection et la validation des composteurs pendant le processus de maturation, dont les températures, atteignant 55-65 °C, sont supposées efficaces pour obtenir l'assainissement bactériologique du **substrat**. Des mesures astreignantes supplémentaires de nature réglementaires sont nécessaires pour les produits compostés provenant des industriels qui produisent des **engrais** en **granulés**. Ceux-ci dérivent en effet du compostage de déchets animaux agricoles comprenant les solides de lisier de porc, la litière de **volaille** et le **compost** usagé des champignons, qui sont porteurs d'agents pathogènes résiduels potentiellement responsables d'intoxications alimentaires, avec des implications pour la chaîne alimentaire incluant l'Homme au final. Pour l'environnement, les stratégies durables de recyclage des **effluents** d'élevage nécessitent que les produits finaux compostés soient débarrassés de leurs agents pathogènes, en accord avec la législation de sécurité environnementale, avant d'être distribués sur le marché. Ce test fournit un outil de caractérisation du risque pour la gestion durable de la sécurité de l'environnement en « validant » la létalité thermique d'un processus de **compostage** donné ou de ses dérivés. Il peut également être mis en œuvre sans compromettre l'intégrité de l'échantillon.

En conclusion, le **compostage** dure environ 46 semaines pour le **fumier** de **volaille**. Il permet une humification (stabilisation) de la **matière organique** contenue dans le **fumier**. Il s'accompagne de l'émission de gaz en quantités importantes. Les émissions d'ammoniac peuvent être diminuées avec différents **amendements** sur le **fumier**. La **figure 3** résume l'ensemble des transformations du **fumier** au cours du **compostage**. Enfin, la méthode consistant à maintenir une température de 70 °C pendant 1 h a été validée pour l'**hygiénisation** de la litière de **volaille** (compostée ou en **granulés**). Elle permet d'éviter les risques liés à la dissémination d'organismes pathogènes lorsque la litière est destinée à l'alimentation animale (voir IV), par exemple.

Figure 3 : bilan des transformations du fumier au cours du compostage. McClintock, 2005.



2. Compostage en piles

Les problèmes environnementaux associés à l'application de **fumier** de **volaille** brut sur les terres agricoles pourraient être atténués en stabilisant les **nutriments** et la teneur en **matière organique** par un **compostage** préalable à l'**épandage**. Dans l'étude de Tiquia et Tam (2002), les changements quantitatifs des propriétés physiques, chimiques et microbiennes de la litière de **volaille** ont été analysés pour comprendre le processus de **compostage** et évaluer l'adaptabilité du produit composté comme **amendement** pour les sols. La litière était compostée en **piles à aération forcée**. La maturation du **compost** de litière de **volaille** était accompagnée par une diminution des températures internes de **compost** jusqu'au niveau de la température ambiante, une augmentation relative des teneurs en Cu, Zn, P, K et NO_x^- totaux et une diminution de la concentration en **carbone**, de la **matière organique**, des fractions extraites (C et NH_4^+ extraits dans l'eau) et des taux de **métaux lourds** du **fumier** de **volaille**. Il a fallu 128 jours pour convertir la litière de **volaille**

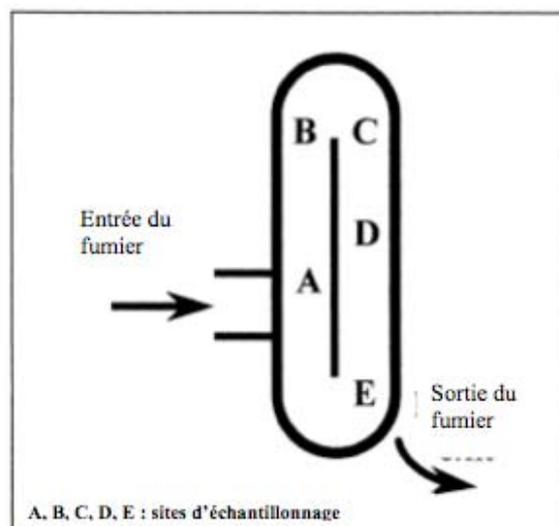
immature en un **compost** mature. Le produit final dérivé de la litière de **volaille** contenait des **nutriments** essentiels pour la croissance des plantes, y compris des oligoéléments.

En conclusion, le **compostage** de la litière de **volaille** a converti les **nutriments** solubles en des formes organiques plus stables, réduisant ainsi leur **biodisponibilité** et les risques de pertes par **ruissellement** lors de l'application sur les terres cultivées.

3. Techniques OkadaND et HosoyaND

Deux principales techniques de **compostage** sont disponibles pour le traitement à la ferme : les systèmes OkadaND et HosoyaND, tous deux d'origine japonaise (la description des deux systèmes est faite par Georgakakis et Krintas, 2000). Ils sont basés sur un système mécanique de retournement et de broyage spécialement conçu à cet effet. Il consiste en une série de couteaux ou fourchettes rotatifs au moyen desquels le **fumier** est complètement retourné, aéré et graduellement poussé vers la sortie de l'usine, laquelle consiste en une fosse longitudinale profonde, ouverte en surface, de forme ovale d'environ 80-100 m de long et 4-6 m de large (*figure 4*).

Figure 4 : schématisation du système Hosoya. D'après Georgakakis et Krintas, 2000.



Ce système convient pour traiter le **fumier** de 100 000 à 120 000 poules pondeuses. La fosse est placée sous un abri fermé de type serre, dont le squelette métallique est recouvert de feuilles de plastique dur de couleur claire. Le but de ce type de couverture est le réchauffement de l'air intérieur par le soleil pendant les jours ensoleillés d'hiver et du début du printemps. Le reste de l'année, la chaleur solaire en excès est évacuée par des grandes ouvertures localisées sur les côtés de la serre.

Le **fumier** remplit la fosse jusqu'à 1,0 à 1,2 m de hauteur. Dans le système OkadaND, la fosse est droite alors que dans le système HosoyaND, elle est de forme ovale. En conséquence, dans le premier cas de figure, le **fumier** est poussé en ligne droite vers la sortie tandis que dans le second, il tourne en continu, et une quantité équivalente à celle qui est entrée dans la fosse ressort par le trou de sortie pour un intervalle de temps donné. Un tour complet de fosse pour HosoyaND dure environ 2,0 h, incluant une période de repos de 15-20 min pour la maintenance ou le repos. En une journée, il y a donc au maximum 12 rotations complètes. Un tour complet du dispositif de broyage résulte en

un déplacement du **fumier** de 1,5 m le long de la fosse ou un maximum de 18 m après 12 tours complets en 24 h. Ainsi, le temps maximum de déplacement pour le **fumier** frais avant d'atteindre la sortie de la fosse de 80 m de long est de 4,44 jours.

Georgakakis et Krintas (2000) ont conduit une étude afin d'optimiser les conditions d'utilisation du système HosoyaND pour le **compostage** du **fumier** de **volaille** dans un élevage de poules en Grèce. La ferme était située à environ 50 km au Nord d'Athènes, avec un système HosoyaND installé qui a été en fonction pendant plus de 4 ans. Pendant l'étude, la performance du système a été étudiée en prélevant notamment des échantillons de matériel dans la fosse (*figure 4*) pour déterminer le taux d'humidité et analyser les **solides volatils** et **totaux**. La température du matériau, tout comme la température et l'**humidité relative** de l'air environnant ont été enregistrés. Les résultats ont montré que le processus de **compostage** ne pouvait pas être achevé dans l'installation HosoyaND. En effet, la rotation et la poussée quotidiennes du **fumier** vers la sortie, nécessaires pour atteindre le taux de rotation désiré, entraînaient une chute précoce de la température du **fumier**, ce qui altérait *de facto* le processus de **compostage** et empêchait sa finalisation. Edwards (1992, dans Georgakakis et Krintas, 2000) a suggéré qu'il faudrait faire tourner le système seulement tous les 2 ou 3 jours. Gray (1972 dans Georgakakis et Krintas, 2000) a mentionné le fait qu'une trop grande agitation peut conduire à une perte excessive de chaleur et d'humidité et réduire les capacités de dégradation du **substrat** par les microorganismes. Une étape supplémentaire est donc nécessaire pour finaliser efficacement le processus de **compostage** de ce type de **fumier**. Dans ce cas, le système HosoyaND peut être considéré comme une étape de pré-compostage mécanique nécessaire pour le **fumier** de poules à fort taux d'humidité et à texture boueuse avant de le composter complètement en disposant le produit obtenu, relativement sec et riche en particules fines de 12 mm de diamètre ou moins en piles ou en conteneurs. Une piste d'étude pour le contrôle de la température suggérée par Georgakakis et Krintas (2000) consisterait en un raccourcissement de la fosse, ce qui permettrait par la même occasion d'en réduire le coût et de diminuer les odeurs, le temps de l'opération et le coût d'entretien de la machine.

En conclusion, le système Hosoya, tel qu'il est utilisé dans l'étude de Georgakakis et Krintas (2000), ne permet pas d'obtenir une maturation complète du **fumier**. Il peut donc être considéré comme une étape de pré-compostage mécanique, qui permet de rendre le **fumier** plus manipulable (voir C. 1.) en l'asséchant et en réduisant la taille des particules qu'il contient.

4. Différents exemples de co-compostages

Le **fumier** de **volaille** est riche en fibres, en **azote** sous forme ammoniacale et en eau. Ces facteurs sont peu favorables au **compostage** de ce matériau isolé, c'est pourquoi on le trouve très souvent co-composté. Le principe général du co-**compostage** du **fumier** de **volaille** repose sur l'augmentation du ratio C/N par l'apport de matières riches en **carbone**, car le ratio C/N des **fumiers** de **volaille** est souvent faible. Cette technique permet ainsi de contrôler les émissions d'ammoniac pendant la maturation, et éventuellement d'accélérer le processus de **compostage**. On co-composte souvent la litière avec des déchets végétaux, des déchets ou des sous-produits industriels (boue de désencrage du papier, déchets de brasserie...), afin de recycler le mélange de déchets ainsi obtenu. D'autre part, le co-compost sera ensuite épandu sur les cultures, c'est pourquoi on cherche à améliorer la quantité et la qualité des **nutriments** disponibles par cette pratique. Un nombre très important de publications existe concernant les co-composts, nous en détaillerons quelques-unes seulement.

Guerra-Rodríguez *et al.* (2001) ont évalué le co-compostage de chardon de châtaigne (*Castanea sativa*) et de litière de feuilles avec du **fumier de volaille solide** en comparant plusieurs paramètres chimiques, physico-chimiques et biologiques. Le **fumier de volaille solide** correspond à une litière profonde, plus riche en matériaux ligno-cellulosiques, ammonium et avec un taux d'humidité plus important. Le pH final du co-compost était de 8,89 et le ratio C/N était de 13. L'**indice de germination** obtenu en utilisant le **compost** variait en fonction des semences utilisées. Il était de 55,35 % pour les semences de fromental (*Arrhenatherum elatius*), 156,56 % pour les semences de blé (*Triticum* sp.) et 100 % pour les semences d'orge (*Hordeum vulgare*). Le co-compost était mature en 103 jours. Le co-compostage du **fumier de volaille** avec un mélange de chardons de châtaigne et de litière de feuilles a permis de diminuer la durée du **compostage** (15 semaines par rapport aux 46 semaines lorsque la litière est compostée seule). Le produit fini présente une bonne innocuité avec des **indices de germination** élevés.

A l'instar des chardons de châtaigne, les déchets d'orge (issus de l'industrie brassicole et des malteries) en Espagne, sont pauvres en **azote** et ne peuvent être compostés seuls. La litière de **volaille** solide peut compenser le déficit en **azote**. Guerra-Rodríguez *et al.* (2000) ont réalisé un **compost** en mélangeant 24 kg de **fumier solide de volaille** et 8 kg de déchets d'orge ; ils ont déterminé un certain nombre de paramètres chimiques et physico-chimiques, et ont également réalisé des tests biologiques sur le mélange de co-compost obtenu. Le ratio 3/1 (3 : **fumier** et 1 : matériel ligno-cellulosique) entre les deux matériaux a été utilisé car Menoyo (1995, dans Guerra-Rodríguez *et al.*, 2000) a montré qu'il était optimal pour co-composter le **fumier de volaille** avec d'autres matériaux ligno-cellulosiques. Le co-compost était mature en 103 jours. Son pH final était de 8,72 et le ratio C/N de 13. Le pourcentage de germination obtenu avec ce produit variait en fonction des semences utilisées. Il était de 186 % pour les graines d'ivraie (*Lolium* sp.), 85,74 % pour les grains de blé et 103 % pour les grains d'orge. On obtient donc de nouveau une accélération du processus de **compostage**, et une innocuité très bonne du **compost** mature avec ce type de mélange.

Raviv *et al.* (1999, dans Kelleher *et al.*, 2002) ont découvert que l'ajout de peaux de pamplemousse écrasées au **compost de fumier de volaille** avait des effets bénéfiques sur les caractéristiques du produit final. La litière de **volaille** non amendée disposée en pile aérée s'échauffait de manière excessive (> 65 °C) induisant une perte rapide de **solides volatils** totaux et d'**azote**. L'ajout de 5 % de MS de peaux de pamplemousse écrasées diminuait le pH de la phase aqueuse de 6,6 à 5,8 et permettait à la température de la pile de rester sous contrôle, en dessous de 60 °C. L'**azote** était mieux conservé que les **solides volatils** totaux dans le mélange avec les peaux, pour un résultat strictement inverse observé dans le **fumier de volaille** seul. Les auteurs suggèrent que l'ammoniac libéré dans le cas du **fumier** composté seul pourrait avoir été fixé par la **matière organique** dans le mélange. L'ajout de peaux de pamplemousse a donc permis de mieux contrôler la température pendant le **compostage**, et d'éviter des pertes d'**azote** importantes sous forme d'ammoniac.

En conclusion, le co-compostage est une alternative intéressante au **compostage** du **fumier** seul. Il permet de gagner de nombreuses semaines par l'accélération du processus biologique, de limiter les pertes d'ammoniac et de modifier les caractéristiques du produit fini en vue de son **épandage**.

5. Amendements pour les composts

a) Zéolithe naturelle

Les **zéolithes** sont des aluminosilicates dont les propriétés d'**adsorption** des ions, notamment métalliques, sont intéressantes. Turan (2008) a étudié la perte de **salinité** due à l'ajout de **zéolithe** naturelle lors du processus de **compostage**. Bien que ce procédé soit une alternative de gestion prometteuse des **effluents** de **volaille**, certains inconvénients alimentent les débats. Le problème principal est le risque d'obtenir un **compost** de **fumier** de **volaille** dont la **salinité** serait excessive. Des valeurs élevées correspondent à une forte teneur en minéraux solubles susceptibles d'inhiber l'activité biologique du **compost** ou de poser des problèmes lors d'une application en grandes quantités sur les terres agricoles. De la **zéolithe** naturelle a donc été appliquée sur la litière à hauteur de 5 à 10 % et le **compost** obtenu comparé à celui obtenu sans **amendement**. La concentration en sels du **compost** final diminuait si on augmentait la quantité de **zéolithe** naturelle utilisée. En utilisant 5 % et 10 % de **zéolithe** naturelle, la **salinité** du produit final diminuait de 66,64 % et 88,92 %, respectivement. La **zéolithe** avait également pour effet de diminuer le pH, le taux d'humidité, et la conductivité du **compost**. Elle augmentait la quantité d'**azote total** tout en réduisant la concentration en ammonium et ammoniac. Elle faisait diminuer le taux de **carbone** total ainsi que le rapport C/N du produit final. Ainsi, l'addition de **zéolithe** naturelle sur la litière de **volaille** s'est avérée bénéfique sur les caractéristiques du **compost** obtenu.

b) Diminution des Composés Organiques Volatils (COVs) par différents traitements

L'objectif de l'étude de Turan *et al.* (2009) était de réduire la production de **composés organiques volatils** (VOCs) pendant le **compostage** de la litière de **volaille**. La **zéolithe** naturelle, la perlite expansée, la pierre ponce et la vermiculite expansée ont été utilisées comme « matériaux naturels » pour réduire les composés organiques volatils. Le **compostage** était réalisé à l'échelle du laboratoire dans une usine de **compostage** interne. La litière de **volaille** était compostée 100 jours avec un *ratio* volumétrique de matériel naturel/litière de **volaille** de 1/10^{ème}. Les composés organiques volatils étaient mesurés en utilisant la méthode FT-IR pour l'analyseur de composés organiques volatils. Les expériences ont montré que la production de composés organiques volatils était plus élevée dans le traitement témoin (litière compostée seule). Les contributeurs majeurs à ces hauts niveaux seraient les composés aromatiques et aliphatiques qui résultent des conditions anaérobies générées lors du processus de **biodégradation**. Les matériaux naturels réduisaient significativement les composés organiques volatils. À la fin du processus, l'efficacité de rétention des VOCs était de 79,73 % pour le traitement **zéolithe** naturelle, 54,59 % avec la perlite expansée, 88,22 % avec la pierre ponce et 61,53 % avec la vermiculite expansée.

6. Recommandations et conclusion

D'un point de vue sanitaire, le **fumier** devrait toujours être composté (Ferguson et Ziegler, 2004), sauf si :

- il a été stocké pendant plus de trois mois sans nouvel apport,
- il est appliqué sur des cultures qui ne sont pas destinées à la consommation humaine,

- il est enfoui dans le sol plus de 120 jours avant la récolte d'un produit dont la partie comestible peut être en contact direct avec la surface ou les particules du sol,
- il est enfoui dans le sol plus de 90 jours avant la récolte d'un produit dont la partie comestible n'a pas de contact direct avec la surface ou les particules du sol.

D'un point de vue environnemental, Kirchmann et Lundvall (1998, dans Kelleher *et al.*, 2002) concluent dans leur étude que le **compostage** des déchets animaux, incluant la litière de **volaille**, devrait être limité à ceux qui ont besoin d'être assainis. Cette conclusion résulte de tests de laboratoire pour étudier l'effet de différents traitements de **fumiers** solides sur les pertes d'ammoniac pendant le stockage. Le **compostage** émettait significativement plus d'ammoniac que la décomposition anaérobie pendant la phase d'incubation. Cependant, l'application du matériel composté sur le sol résultait en des pertes moindres en ammoniac, puisque les concentrations résiduelles en ammonium étaient faibles. Un abattement important des pertes d'ammoniac pourrait être obtenu à condition de sécher les **fientes** avant le stockage.

En conclusion, le **compostage** est un traitement simple de la litière qui a pour conséquence une diminution du volume des déchets, une consistance améliorée des **fumiers** (matériel inodore, texture fine, taux d'humidité faible), une humification de la **matière organique**, et une élimination des agents pathogènes (Florin *et al.*, 2009 ; Preusch *et al.*, 2004). Les inconvénients de la **biodégradation** sont une perte d'**azote** et d'autres **nutriments** pendant le **compostage**, le coût des équipements nécessaires, le travail important, et les nuisances odorantes (ammoniac) qu'elle entraîne (Kelleher *et al.*, 2002).

Le processus de **compostage** immobilise l'**azote** dans la litière et produit de l'humus, une source de **matière organique** et de **nutriments** à libération lente. La libération lente des **nutriments** à partir de la litière compostée pourrait diminuer les effets néfastes pour l'environnement, causés par le **lessivage** de l'**azote** dans les eaux de **ruissellement** des fermes (Preusch *et al.*, 2004).

Le **compostage** conduit également (lorsqu'un chauffage à 70 °C pendant 3 h minimum a lieu) à une élimination des bactéries pathogènes dans le produit final. Si ce chauffage n'a pas lieu spontanément, il peut être remplacé par un traitement thermique à 70°C pendant 1 heure du **compost**.

F. Granulation

Des techniques appropriées de gestion de la litière de poulet de chair sont nécessaires pour réduire voire éviter les risques de pollution autour des installations de production. Il en est ainsi de la **granulation**. Les objectifs de Hammac II *et al.* (2007) étaient de déterminer l'impact de cette transformation sur la concentration en **nutriments** du produit final et de déterminer la **disponibilité** de l'**azote** et du **phosphore** après **épandage** de litière de **volaille** sous forme de **granulés**. Une expérimentation sous serre portant sur des cultures d'ivraie (*Lolium multiflorum*) et de sorgho commun (*Sorghum bicolor*) a permis d'évaluer l'accumulation de matière sèche et le prélèvement d'**azote** et de **phosphore** par les plantes. Les données cumulées sur toutes les coupes montraient que les **granulés** induisaient un prélèvement d'**azote** et de **phosphore** plus faible par rapport à l'emploi de ces deux éléments sous forme inorganique. La production de **biomasse** sèche après application de cette nouvelle formule était inférieure à celle impliquant l'apport de nitrate d'ammonium (NH₄NO₃) mais similaire à celle consécutive à l'utilisation de phosphate de calcium. Ceci indique que la litière de **volaille** en **granulés** peut servir comme source d'**azote** et de **phosphore** pour les plantes bien que la **disponibilité** de ces deux éléments puisse être plus limitée comparée aux **engrais** inorganiques.

Le chauffage et la déshydratation de la litière de **volaille** réduiraient le nombre de microorganismes pathogènes à un faible niveau, voire pourraient les éliminer complètement. Il est possible, cependant, pour les bactéries aptes à sporuler de survivre à ces traitements, mais le risque de botulisme, par exemple, peut être substantiellement réduit si les cadavres d'oiseaux sont systématiquement relevés pour éviter qu'ils ne soient compostés avec la litière (Jeremiah et Gibson, 2003).

Le **fumier** de **volaille** peut également être **granulé** avec d'autres déchets ou sous-produits, afin d'améliorer la qualité du produit fini et sa capacité à répondre aux besoins des plantes. Ces préparations **granulées** sont appelées « **engrais** à libération progressive de **nutriments** ». Dans leur article, Rao *et al.* (2007) exposent les résultats qu'ils ont obtenus avec le **compostage** de **déchets solides** de porc (20 % du poids total), mélangé avec d'autres **substrats** biodégradables disponibles localement, comprenant la litière de **volaille** (26 %), le **compost** usagé de champignons (26 %), les coques de cacao (18 %) et le papier émincé humidifié (10 %). Les **composts** matures de 6 mois d'âge avaient une composition en **nutriments** de 2,3 % d'**azote total**, 1,6 % de **phosphore** et 3,1 % de potassium, donc trop faible pour une application directe comme **engrais** agricole. Des formulations incorporant du sang séché ou des **amendements** à base de plumes augmentaient le taux d'**azote** organique, diminuaient le taux d'humidité dans les mélanges de **composts** matures et facilitaient le processus de **granulation**. L'inclusion de suppléments minéraux, de sulfate d'ammonium, de phosphorite et de sulfate de potassium permettait d'obtenir des **engrais** à libération progressive de **nutriments** avec des ratios N/P/K de 10/3/6 et 3/10/5 qui étaient étudiés pour des prairies d'agrément comme les terrains de golf, pour l'application au printemps ou en été, et pour l'**épandage** d'automne respectivement. Des tests microbiologiques rigoureux (PCR et cultures bactériennes) entrepris tout au long du processus de **compostage** et des phases de **granulation** indiquaient que les **engrais** organo-minéraux formulés étaient dépourvus d'agents pathogènes bactériens végétatifs.

En conclusion, la **granulation** est un procédé industriel simple qui permet d'obtenir un produit sec, compact et sain, prêt à l'emploi pour être épandu sur les cultures.

De nombreuses possibilités sont offertes aux éleveurs pour l'évacuation, le stockage et le **compostage** de la litière. Au cours de ces différentes étapes, de nombreuses émissions gazeuses peuvent avoir lieu ; il convient en conséquence d'adopter des pratiques d'élevage pour les limiter (**amendements** de **zéolithe**, inoculations bactériennes, par exemple). Le **compostage** du **fumier** peut se faire soit seul, soit associé à d'autres déchets ou sous-produits. Cette dernière solution est une alternative intéressante qui permet de recycler plusieurs déchets ensemble tout en améliorant les qualités du produit final.

III. LES LITIERES, AMENDEMENTS POUR LES SOLS

A. Épandage sur les cultures

Le **fumier** de **volaille** a traditionnellement été épandu sur les cultures. Cependant, cette technique peut conduire à un enrichissement de l'eau en certains éléments organiques minéraux si on ne prend pas en compte les besoins en **nutriments** des plantes cultivées sur les parcelles traitées résultant en l'**eutrophisation** des plans d'eau, à la dispersion d'agents pathogènes, à la production de substances phytotoxiques, à la pollution de l'air et l'émission de gaz à effet de serre (Kelleher *et al.*, 2002).

Un des risques principaux pour l'environnement de la production de **volaille** est l'excès en **azote** et **phosphore** des **effluents** sortant des élevages avicoles. La concentration de ces deux **nutriments** dans le **fumier** de **volaille** n'est pas strictement proportionnelle aux besoins des plantes (Szogi et Vanotti, 2009). Lorsque l'**épandage** sur les terres cultivées est calculé sur la base des besoins en **azote**, un excès de **phosphore** est de fait appliqué, à cause du faible ratio N/P (2/1) du **fumier** d'origine avicole, ce qui conduit à son accumulation dans le sol (Szogi et Vanotti, 2009 ; Allen *et al.*, 2006). Cet élément peut alors être lessivé sous forme de **phosphore soluble** dans le **ruissellement** et contribuer à l'**eutrophisation** des eaux de surface (Szogi et Vanotti, 2009).

Le **compostage** réduit le ratio N/P à approximativement 1/1 (Tyson et Cabrera, 1993 dans Andrews *et al.*, 1999), ce qui pourrait entraîner des taux d'application plus élevés par hectare, exacerbant les problèmes d'accumulation du **phosphore**.

Si le **fumier** de **volaille** est apporté en excès par rapport aux besoins azotés des cultures, les nitrates excédentaires peuvent alors polluer les nappes phréatiques (Nyakatawa *et al.*, 2001b) et provoquer chez l'homme une méthémoglobinémie (« syndrome du bébé bleu »), des cancers ou des maladies respiratoires. Chez les animaux, les nitrates sont responsables de résorptions fœtales (Nyakatawa *et al.*, 2001b).

1. Systèmes de gestion informatique des épandages

Bosch et Napit (1992 dans Reddy *et al.*, 2009) ont étudié la viabilité économique du transport de **fumier** de poulet de chair depuis les zones excédentaires vers les zones déficitaires. Les résultats de l'étude montraient que la valeur du **fumier** comme **engrais** était plus élevée que les coûts associés à son transfert, jusqu'à une distance de plus de 50 miles (soit 80 km).

Cette distance est faible par rapport à l'estimation de Paudel *et al.* (2004). Ces derniers ont calculé la rentabilité de l'utilisation du **fumier** de **volaille** comme source de **nutriments** pour les cultures en utilisant une règle d'application de la fumure organique basée sur sa concentration en **phosphore**. Une tonne de litière peut être transportée jusqu'à 164 miles soit 260 km environ à partir de l'installation de production. Un modèle de transport basé sur le **phosphore** pour réduire les coûts, développé pour combler les besoins en **nutriments** de 29 comtés au Nord de l'Alabama révélait que tout le **fumier** ne pouvait pas être utilisé dans la région. Le coût total augmentait lorsque le transport du **fumier** hors des comtés largement excédentaires était privilégié. L'utilisation totale du **fumier** était très peu affectée par les changements de prix des **engrais**. Les simulations de prix permettaient de tester de nombreuses situations.

Les disparités à l'intérieur d'un état peuvent également encourager le développement d'outils informatiques de gestion des **épandages** sur l'ensemble du territoire. C'est le cas de l'Alabama qui produit chaque année 1,8 million de tonnes de **fumier**. Comme la production de **volaille** est concentrée principalement dans le Nord de cet Etat soit dans la région du plateau Appalache, cette zone souffre d'un **épandage** excessif de **fumier** depuis 25 ans, induisant une accumulation du **phosphore** dans le sol et une dispersion par **ruissellement** d'agents pathogènes et de **phosphore**

depuis les zones d'**épandage**. Inversement, l'agriculture est peu développée dans la région de la Ceinture Noire située plus au Sud dont les sols sont moins fertiles. Afin de réaliser une gestion raisonnée du **fumier de volaille** dans cet état, les excédents obtenus dans les zones de production intensive sur le plateau Appalache devraient être redistribués de manière optimale ou transportés plus au Sud pour une utilisation dans la région de la Ceinture Noire. Dans cet esprit, Kang *et al.* (2008) ont développé un système détaillé d'information géographique (Geographic Information System, GIS) pour la gestion du **fumier de volaille** dans et hors des élevages avicoles sur le plateau des Appalaches et la région de la Ceinture Noire. Le système intuitif détaillé intègre la planification de l'utilisation des **nutriments**, l'analyse du transport et la gestion des données relatifs à l'emploi des **effluents de volaille** comme fumure. Il peut aider à réduire les **épandages** excessifs. Aussi, grâce à cette approche, le **fumier** peut être redirigé de façon optimale vers les aires déficitaires en **nutriments**, à coût maîtrisé et en respectant l'environnement de Alabama.

En conclusion, les systèmes informatiques sont une solution d'avenir pour la gestion des **épandages** à large échelle. Cependant, ces solutions sont complexes et coûteuses à mettre en place, elles nécessitent une connaissance précise des besoins en **nutriments** des terres concernées.

2. Contexte agricole du Sud Est des Etats-Unis d'Amérique

Le Sud Est des Etats-Unis d'Amérique produit les trois quarts de la production de **volaille** du pays. Le **fumier de volaille** y est donc produit en quantités très importantes (voir I. G.). Par ailleurs, c'est aussi une région de cultures intensives, notamment de coton (*Gossypium hirsutum*) et de maïs (*Zea mays*), qui conduisent à une érosion importante des sols. C'est pourquoi de nombreuses études sont conduites dans cette zone pour tenter d'endiguer le processus d'érosion engendré par les décennies de cultures intensives. Le **fumier de volaille** y est de plus en plus utilisé comme **amendement** pour les cultures car il s'est avéré être un **engrais** efficace et est généré en quantités abondantes dans ces régions (Tewolde *et al.*, 2009). De plus, le **fumier** est beaucoup moins cher que les **engrais** chimiques particulièrement ces dernières années où le prix de ces derniers a doublé en Amérique du Nord.

Il a été utilisé avec succès comme **engrais** pour la production de maïs, de céréales à paille, des fruits et des légumes (Nyakatawa *et al.*, 2001c). C'est une source relativement bon marché de macronutriments (N, P, K, Ca, Mg, S) et de micronutriments (Cu, Fe, Mn, B) et il peut augmenter la **matière organique** azotée, le taux de **carbone**, la **porosité** et améliorer l'activité microbienne du sol (Nyakatawa *et al.*, 2001c).

a) Production de coton, de maïs et industrie de la volaille

Le coton est devenu une culture dominante dans le Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique. D'autre part, la Géorgie et les Etats limitrophes produisent environ 42 % de la **volaille** nationale. En Géorgie seulement, cela génère plus de 1,6 millions de tonnes de **fumier** annuellement. La valeur fertilisante du **fumier** est bien reconnue, mais une grande partie est appliquée sur les pâtures et peu sur les terres cultivées.

b) Érosion et pratiques aratoires anti-érosives et culture de couverture

L'érosion du sol est une menace majeure pour la survie de l'économie agricole mondiale à moyen et long terme et de l'environnement. En effet, la productivité du sol diminue avec l'érosion qui se traduit par une réduction des niveaux de **matière organique** dans le sol Les **pratiques aratoires**

anti-érosives, comme le système sans **labour** ou le **labour paillis** avec une **culture de couverture** de seigle (*Secale cereale*) en hiver modifient les propriétés chimiques du sol, ce qui affecte la croissance des cultures et l'environnement. Le concept du « sans **labour** » est apparu dans les années 1950, mais son implantation a plus largement commencé dans les années 1980 aux Etats-Unis d'Amérique puis en Australie, en Amérique du Sud et au Canada. Les bénéfices majeurs du système sans **labour**, par rapport au **labour** conventionnel, incluent une moindre érosion et donc une amélioration de la qualité du sol (Nyakatawa *et al.*, 2001a), une diminution des apports d'intrants, du travail et du coût des équipements (Reddy *et al.*, 2009). Seulement 12 % des 620 000 hectares concernés, en Géorgie, par exemple, utilisent les **pratiques aratoires anti-érosives**.

De nombreuses études présentées dans les chapitres suivants sont construites suivant le même modèle : l'évaluation de l'effet du type de labour (labour conventionnel avec enfouissement, sans labour ou labour paillis) et de la culture de couverture, ainsi que la comparaison entre 2 types de fertilisation azotée, par un engrais azoté conventionnel (classiquement : l'urée-ammonium-nitrate ou UAN) ou par le fumier de volaille. Dans le texte, nous mentionnerons que l'étude a lieu dans le Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique pour faire référence à ce modèle.

3. Épandage sur différents types de cultures

a) Pâtures

Dans les zones de fortes concentrations d'élevages avicoles, le **fumier** a historiquement été épandu sur les pâtures proches des installations de production, mais la pollution de l'eau par le **phosphore** issu de ce type d'**effluents** et dans une moindre mesure par l'**azote** a conduit à des réductions volontaires ciblées et encadrées par la législation de ces pratiques. Les taux d'application classiquement utilisés sur les plaines fourragères et les pâtures vont de 4,5 à 11,2 tonnes de matière brute par ha (Adams *et al.*, 1994 dans Liechty *et al.*, 2009).

L'emploi judicieux du **fumier** de **volaille** solide peut permettre l'obtention de pâtures et de cultures très productives et valorisables. Cependant, ces **effluents** sont potentiellement à risque pour la santé humaine et animale. Le guide de bonnes pratiques proposé par Griffiths (2007) a pour but d'aider les agriculteurs à utiliser correctement ce **substrat** afin d'optimiser la production des pâtures tout en minimisant les risques des produits dérivés pour la santé des troupeaux et des consommateurs tout comme la pollution de l'environnement.

Une utilisation raisonnée de l'**engrais** combine une « budgétisation » des **nutriments** (*i.e.* la connaissance précise des **nutriments** utilisés) avec des tests du sol (pour vérifier si les niveaux recherchés pour les différents **nutriments** sont atteints).

Il serait possible d'enfouir le **fumier** dans le sol ; cependant, cette pratique détruit les pâtures établies et augmente le risque d'érosion du sol.

Épandre sur une pâture récemment broutée ou fauchée laissant 5 à 10 cm de hauteur d'herbe facilitera la fixation du **fumier** sur place et diminuera les pertes par **lessivage**. Pour protéger davantage les cours d'eau, il faut maintenir une végétation « tampon », non amendée, de 10 à 30 m de largeur sur tout le pourtour des zones d'**épandage** et le long de tous les cours d'eau. La largeur de la zone tampon dépendra de la pente, de la végétation de couverture et de l'**eutrophisation** ou non des cours d'eau.

Des recommandations très générales proposent un plan d'application de 15 m³/ha pour les deux ou trois premières années sur des pâtures intensives irriguées, puis conseillent de tester le sol pour vérifier que la concentration en **phosphore** a atteint le niveau désiré. Ensuite, on appliquera en alternance chaque année le **fumier de volaille** et un **engrais** azoté ou potassique si nécessaire. Sur une terre moins productive, sèche, ou sur des aires d'**épandage** pâturées, le même principe s'applique, mais en employant moins d'**engrais** pour maintenir les niveaux de production ciblés.

b) Coton

Le coton a en général répondu positivement en termes de **rendement** lors d'application directe de **fumier de volaille** dans des systèmes de **labour** conventionnel (Nyakatawa *et al.*, 2001c).

Tewelde *et al.* (2009) ont testé si le **fumier** de poulet améliorait la fourniture en macronutriments (N, P, K et Mg) des plants de coton par rapport à des **engrais** conventionnels inorganiques et déterminé si l'absence de **fumier** réduisait la concentration en macronutriments dans les différentes parties du plant de coton dans le Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique. Le traitement azoté était ajusté pour fournir 101 kg/ha d'**azote** disponible pour les plantes, en considérant qu'environ l'intégralité de l'UAN et 50 % de l'**azote total** du **fumier** devenaient disponibles pour la plante pendant la phase de croissance du coton. Les concentrations en **azote**, **phosphore** et potassium ont été mesurées dans les feuilles, les tiges et les parties reproductrices à 3 ou 4 reprises entre le début de la floraison et la maturité. Les feuilles, tiges et parties reproductrices du coton fertilisé avec les traitements à base de **fumier** seul présentaient une concentration en **azote** invariablement plus faible mais des concentrations en **phosphore** et en potassium plus élevées que le coton exposé à l'**engrais** conventionnel uniquement. La concentration en magnésium dans les feuilles et les tiges semblait dépendre de la concentration en **azote** dans ces parties de la plante. L'absence d'**enfouissement** du **fumier** dans le sol diminuait la concentration en **azote** dans presque toutes les parties de la plante à tous les stades de croissance, suggérant ainsi qu'une partie de l'**azote** dérivé du **fumier** serait perdue. Elle était également associée à une diminution de la concentration en magnésium dans les feuilles et la tige, mais aucun effet sur les concentrations en **phosphore** et en potassium dans les parties de la plante n'était observé. Indépendamment du traitement d'**enfouissement**, la fertilisation avec les traitements à base de **fumier** seul augmentait les concentrations en **phosphore** et en potassium dans les tissus végétaux ainsi que le **rendement** en peluches, par rapport au traitement standard, sans toutefois accroître la teneur en **azote** dans les tissus.

Le coton fertilisé avec le **fumier** recevait donc suffisamment d'**azote**. Cet **engrais** organique peut donc être appliqué en considérant que 50 % de la concentration d'**azote** mesurée dans l'analyse élémentaire devient disponible pour la plante pendant la phase de croissance.

Le **fumier** peut être apporté sous 2 formes : **fumier** frais ou composté. Reddy *et al.* (2007) ont comparé trois sources d'**azote** : l'urée, le **fumier de volaille** frais et le **fumier de volaille** composté à 40, 80 et 120 kg d'**azote** disponible pour les plantes par hectare, avec ou sans **carboxyméthyl pyrazole** (CP). Ces traitements ont été évalués pour leur effet sur la croissance du coton et son **rendement** en Alabama de 1994 à 1998. Parmi les trois sources d'**azote**, le **fumier de volaille** frais induisait le plus haut **rendement** en peluches pendant les 5 ans d'étude (1492 kg/ha) par rapport au **fumier** composté (1392 kg/ha) et à l'urée (1391 kg/ha). Le **compostage** du **fumier** frais n'avait donc pas d'effet positif sur la croissance ou le **rendement** du coton. Le CP n'avait pas d'impact significatif sur ces deux mêmes critères. La libération progressive du nitrate par l'**amendement** de CP n'a donc pas d'influence sur l'amélioration du **rendement** par le **fumier de volaille**.

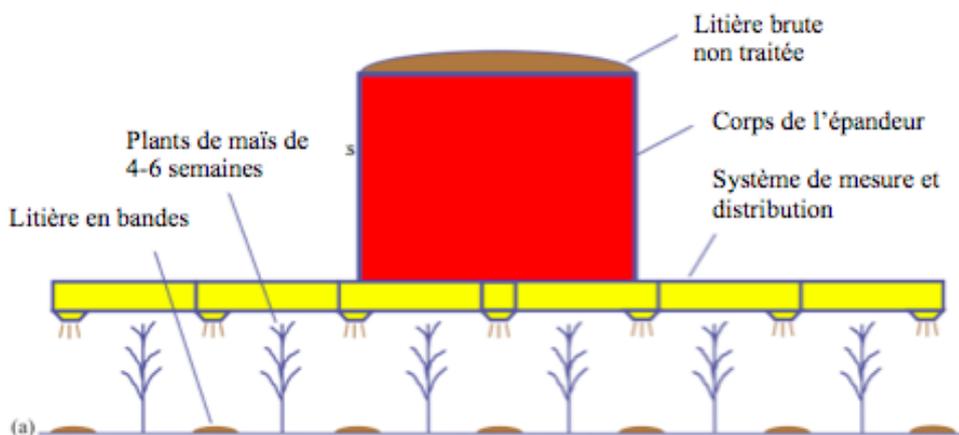
En conclusion, le **fumier** de **volaille** peut être utilisé comme **engrais** pour le coton sans nuire à la production (évaluée par le **rendement** en peluches). La pratique consistant à l'appliquer en considérant que 50 % de l'**azote total** mesuré est disponible pendant la saison de croissance est validée par les études sur le terrain. De plus, il est préférable d'apporter du **fumier** frais plutôt que composté pour l'optimisation de la production.

c) Maïs

Sistani *et al.* (2008a) ont évalué le **fumier** de poulet comme source de **nutriments** pour la production de maïs, l'influence du **labour** et les effets résiduels qui suivent l'application de cet **engrais** dans le Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique. Ils ont également étudié les conséquences de l'application de **fumier** sur les concentrations de certains éléments dans le sol, particulièrement le **phosphore**, le zinc et le cuivre. Le **fumier** de **volaille** était appliqué à 11 ou 22 t de matière brute/ha. Le maïs était cultivé avec du **fumier** de **volaille** et de l'**engrais** inorganique appliqués sur les mêmes lots chaque année de 1998 à 2001. En 2002 et 2003, le maïs a été planté sans **labour**, sans ajout de **fumier** (pour évaluer la **fertilité résiduelle** du **fumier**) ; un **engrais** contenant seulement de l'**azote** était alors épandu pour combler les besoins du maïs. Des échantillons de sol ont été prélevés chaque année au printemps, avant l'application de **fumier**, et 4 ans après l'arrêt du traitement pour évaluer le statut des **nutriments** résiduels dans le sol. Sur les quatre ans de l'expérimentation, le **fumier** de poulet appliqué générait un **rendement** en grains de maïs significativement plus important que l'application équivalente d'**azote** sous forme d'**engrais** chimique pendant 2 ans ; elle produisait un **rendement** similaire les deux autres années. Après 4 ans d'application de **fumier**, le test **Mehlich-3P** a augmenté de 18 mg/kg initialement à 156 mg/kg avec 11 t/ha et à 257 mg/kg avec 22 t/ha de litière. Chaque apport supplémentaire de 6 kg/ha de **phosphore** sous forme de **fumier** avait pour conséquence une augmentation de 1 mg/kg du test **Mehlich-3P**. Des augmentations modestes du test **Mehlich-3** Cu et Zn ne permettaient pas d'atteindre des niveaux phytotoxiques.

Le mode d'**épandage** du **fumier** peut également déterminer la **disponibilité** de l'**azote** pour le maïs. L'emploi d'un applicateur pour l'**épandage** de **déchets solides** en surface (ou l'**épandage** entre les rangs, *figure 5*) à destination des cultures de céréales en rangs a été évalué par Glancey *et al.* (2008). L'appareil peut délivrer une quantité précise de **fumier** animal et d'autres **substrats** solides bruts entre les rangs de céréales en croissance sans que le matériel ne soit en contact avec les plants. Les résultats de l'étude de terrain sur 3 ans indiquaient clairement que la mise à disposition en surface du **fumier** de **volaille** au moyen de cet équipement d'**épandage** et un suivi précis du taux d'**azote** dans le sol et la plante, pourraient améliorer l'efficacité agronomique de la production de maïs sans toutefois nuire à l'environnement. Les **rendements** économiques optimaux étaient obtenus avec des **engrais** azotés au démarrage et des taux modérés d'**azote** dans le sol de surface. L'**épandage** de **fumier** de **volaille** en surface était aussi efficace que l'utilisation d'**engrais** du commerce (urée-ammonium-nitrate) dans les mêmes conditions. Le premier traitement revenait néanmoins à environ 10 \$/ha de plus que la mise en œuvre des méthodes conventionnelles, ce qui pouvait être attribué aux plus faibles concentrations en **azote** dans le **fumier**, nécessitant significativement plus de sessions d'**épandage** et un temps d'opération plus long par hectare.

Figure 5 : vue schématique d'un épandeur de déchets solides (a) et photographie du côté gauche de l'épandeur (b). D'après Glancey *et al.*, 2008.



En conclusion, les études précédentes ont montré que le taux optimal de 11 t/ha pour l'application de **fumier de volaille**, appliqué pendant 4 ans produisait des **rendements** en grains de maïs similaires aux **engrais** chimiques sans **labour** ou avec un **labour** conventionnel et que les taux de **phosphore**, cuivre et zinc restaient sous les valeurs limites considérées comme nocives pour la qualité des eaux de surface ou les céréales. D'autre part, l'**épandage** de **fumier** en surface permettrait d'obtenir un **rendement** en maïs équivalent tout en préservant l'environnement. Cependant, cette pratique s'accompagne d'un surcoût important, ce qui limite son utilisation à la ferme.

d) Cultures mixtes : coton et seigle ± maïs

Endale *et al.* (2002) ont comparé les **rendements** du coton de 1996 à 1999 (Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique). Le meilleur **rendement** moyen en **peluches** pendant cette période a été obtenu pour le système sans **labour** associé à la fertilisation par le **fumier de volaille**. Le **rendement** le plus faible était observé avec le **labour** conventionnel associé à l'**engrais** conventionnel (UAN). Les différences étaient significatives, pour le **fumier de volaille**, entre le **labour** conventionnel et l'absence de **labour**. En revanche, les différences de **rendement** moyen n'étaient pas significatives entre le traitement avec le **fumier de volaille** ou l'**engrais** conventionnel. Le système sans **labour** retenait généralement mieux l'eau dans le sol que le système avec **labour** conventionnel. Les différences de **rendement** en fonction des traitements testés ont été observées pendant les trois

premières années seulement. La sécheresse de la quatrième année a réduit les **rendements** quels que soient les traitements appliqués et a neutralisé leurs effets. La fertilisation par le **fumier de volaille** permet donc d'obtenir un **rendement** similaire à celui induit par les **engrais** conventionnels. Lorsqu'elle est associée aux **pratiques aratoires anti-érosives**, le **rendement** est cette fois-ci significativement supérieur.

Mais le problème majeur de la production de coton est l'érosion. Pour observer l'effet des **épandages de fumier de volaille** sur celle-ci, Nyakatawa *et al.* (2001b) ont étudié le pH, la **matière organique** et les concentrations en **azote** et en **phosphore** du sol dans des parcelles de coton du Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique. L'étude a été réalisée sur un terreau limoneux du Nord de l'Alabama de 1996 à 1998. Le taux de **matière organique** du sol pour les systèmes sans **labour** et à **labour paillis** dans les 15 premiers cm sous la surface était de 22 g/kg en 1998 soit significativement plus élevée qu'en Novembre 1996 (15 g/kg). Un résultat similaire était obtenu avec une **culture de couverture** de seigle d'hiver par rapport à un système coton/jachère hivernale. L'application de **fumier de volaille** en surface à 100 ou 200 kg N/ha augmentait la **matière organique** du sol de 55 à 80 %. Dans le traitement avec **fumier de volaille** à 200 kg N/ha, la concentration en ammonium à 30-90 cm de profondeur en Novembre 1998 était 23 % supérieur à celle de Novembre 1996. Par rapport au nitrate d'ammonium, les parcelles amendées avec le **fumier de volaille** présentaient plus de 40 % de nitrates supplémentaires à la profondeur de 0-30 cm au bout de la première année d'étude. La quantité de **phosphore** extractible (**Mehlich-3**) et le pH du sol à la fin de l'étude étaient similaires à ceux du début.

Cette étude montre que le système sans **labour** comme le **labour paillis**, la **culture de couverture** (seigle d'hiver) et l'application en surface de **fumier de volaille** sur les plantations de coton peuvent rapidement augmenter la concentration en **matière organique** du sol en surface. Ce résultat serait attribué à une oxydation biologique moindre des résidus de culture et du **carbone** du sol apporté par le **fumier de volaille**. Les prélèvements d'**azote** et de **phosphore** par la **culture de couverture** ont évité un accroissement significatif de ces **nutriments** dans le sol.

Nyakatawa *et al.* (2001c) ont réalisé une seconde étude dans les mêmes conditions au Nord de l'Alabama, de 1996 à 1999. L'étude recensait les effets résiduels de l'**amendement de fumier**. Le seigle grandissait sans ajout d'**azote** alors que le maïs croissait avec 3 niveaux d'**azote** inorganique (0, 100 ou 200 kg N/ha). Le **fumier de volaille** était appliqué sur le coton en 1997 et 1998 à 0, 100 et 200 kg N/ha. L'**azote** résiduel du **fumier de volaille** appliquée sur le coton en 1997 et 1998 a produit plus de 2,0 et 17,3 t/ha respectivement, de seigle de couverture et de **biomasse** de maïs (incluant 7,1 t/ha de **rendement** en maïs grain) sans ajout d'aucun autre **engrais**. Donc, en plus de fournir des résidus de récolte, ce qui diminue l'érosion, la **culture de couverture** de seigle augmente la **biomasse** organique et conserve l'humidité du sol ; elle était capable en plus de capter l'**azote** résiduel laissé par la récolte de coton, qui sans cela risquait d'être lessivé et de polluer les ressources hydrologiques. Le **fumier de volaille** appliqué sur le coton avait également pour effet d'augmenter l'**azote** dans les grains de maïs jusqu'à une teneur de 100 % par rapport à un traitement sans **azote**. Son plus faible taux de libération de l'**azote** par rapport à un **engrais** inorganique pouvait non seulement réduire les coûts en **engrais** inorganiques azotés utilisés pour la maïsiculture mais également réduire le risque de **lessivage** de l'**azote** sous forme de nitrates vers les nappes phréatiques. La quantité maximale de résidus de récolte ajoutés au système de récolte basé sur le coton était de 21,3 t/ha. La croissance du seigle d'hiver (conduisant aux résidus de récolte) était permise par l'**azote** des fertilisations précédentes avec le **fumier** et l'**azote** inorganique. Les résidus de récolte conduiraient à une augmentation du **carbone** organique dans le sol et à une amélioration de la structure du sol à long terme, et donc à une réduction de l'érosion.

L'étude de Nyakatawa *et al.* (2001c) démontre donc que le coton dans un système de **pratiques aratoires anti-érosives** en association avec une **culture de couverture** de seigle en alternance avec la maïsiculture pourraient consommer avec profit de grandes quantités de **fumier de volaille** tout en évitant les risques potentiels pour l'environnement.

Reddy *et al.* (2009) ont étudié les effets de la fertilisation avec le **fumier** sur la rotation coton/maïs, mais sur le long terme et en se concentrant sur le **phosphore** dans le sol. Le pH et la concentration de **phosphore** disponible du sol ont été étudiés 12 ans après le début de l'expérience (soit après 8 applications de **fumier de volaille**) et comparés aux valeurs initiales. L'application à long terme de **fumier de volaille** (100 kg N/ha/an) ne changeait pas significativement le pH d'origine du sol dans les systèmes à **labour** conventionnel ou **labour paillis** alors que l'application de nitrate d'ammonium le diminuait. Dans les parcelles sans **labour**, le **fumier de volaille** à 100 kg N/ha ne permettait pas de garder un pH stable par rapport au pH d'origine, mais 200 kg N/ha maintenaient le pH d'origine du sol. L'application de **fumier de volaille** à 100 kg N/ha ne modifiait pas significativement les taux originels de **phosphore** disponible sous toutes les pratiques de **labour** alors que l'utilisation de nitrate d'ammonium diminuait la quantité de **phosphore** disponible. Bien que non significatifs, des taux élevés de **phosphore** étaient observés dans tous les systèmes de **labour** par rapport au niveau de **phosphore** de départ, ce qui indique la possibilité d'une accumulation de cet élément dans le futur avec d'autres applications de **fumier de volaille**. L'**épandage** de **fumier de volaille** à 200 kg N/ha dans les parcelles sans **labour** résultait en une augmentation significative du **phosphore**. Les résultats indiquent que les parcelles sans **labour** donnent des **rendements** similaires à celles soumises à **labour** conventionnel lorsqu'elles reçoivent du nitrate d'ammonium, mais qu'elles nécessitent des taux plus importants de **fumier de volaille** pour atteindre des **rendements** similaires au **labour** conventionnel.

Considérant le fait que le taux le plus élevé de **fumier de volaille** (200 kg N/ha) conduit à une accumulation du **phosphore** dans le sol, le système sans **labour** avec utilisation de **fumier de volaille** à 100 kg N/ha combiné à la **culture de couverture** de seigle d'hiver et à la rotation de maïs peut être recommandé pour une production de coton durable.

Enfin, Nyakatawa *et al.* (2007) ont utilisé le modèle informatique RUSLE 2.0 (Revised Universal Soil Equation) pour évaluer les estimations de l'érosion du sol à long terme établies en t/ha/an dans les parcelles de coton (Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique). Elles correspondaient à la quantité de sol perdue dans les ravines, sur une parcelle à pente définie. Sur les parcelles de coton avec le système de **labour** conventionnel et le seigle d'hiver comme **culture de couverture**, les pertes par érosion diminuaient de 35 % soit de 8,0 t/ha/an en 1997 à 5,1 t/ha/an en 2004. Ce résultat a été longtemps attribué à l'effet cumulatif de la couverture de résidus en surface qui augmentait de 17 %, soit de 20 % en 1997 à 37 % en 2004. Dans le **labour** conventionnel, sans couverture de culture, les estimations d'érosion du sol étaient de 11,0 t/ha/an en 1997 et passaient à 12,0 t/ha/an en 2004. Dans le système sans **labour**, les estimations d'érosion du sol restaient généralement stables pendant la période d'étude, avoisinant 0,5 et 1,3 t/ha/an avec et sans seigle d'hiver, respectivement. Cette étude montre que la **culture de couverture** est cruciale pour réduire l'érosion du sol et pour augmenter la survie à long terme de la production de coton. L'application d'**azote** sous forme de nitrate d'ammonium ou de **fumier de volaille** augmentait significativement la couverture de canopée du coton et la **biomasse** des racines de surface, qui représentent les indicateurs spécifiques recherchés pour évaluer la réduction de l'érosion du sol dans les parcelles de *Gossypium*. L'emploi du **fumier de volaille** comme source d'**azote** pour la production de coton fournirait ainsi une stratégie pertinente pour recycler utilement ces **effluents** dans une zone où cet **engrais** biologique très excédentaire constitue un problème environnemental.

En conclusion, l'application de **fumier** de **volaille** sur les cultures de coton au taux de 200 kg N/ha permet d'obtenir un **rendement** similaire à l'application d'**engrais** conventionnel. Associée aux **pratiques aratoires anti-érosives** et à une **culture de couverture** de seigle d'hiver, elle augmente la teneur en **matière organique** du sol et diminue l'érosion. De plus, elle fournit suffisamment de **nutriments** pour permettre la croissance du maïs sans ajout d'**engrais (fertilité résiduelle)**. Ces pratiques permettent ainsi d'éviter un **lessivage** des nitrates, et augmentent la qualité du maïs récolté (teneur en **azote** des grains). En revanche, l'**épandage** de **fumier** à cette dose s'accompagne d'une augmentation significative du **phosphore** dans certaines études, c'est pourquoi, malgré les effets bénéfiques de l'apport de 200 kg N/ha de **fumier**, il est souvent recommandé de réduire le taux d'application à 100 kg N/ha, pour une production durable du coton.

e) Forêts

Les forêts de pin Taeda ou pin à torches (*Pinus taeda*) sont fréquentes à proximité des installations de production de **volaille** et peuvent constituer un support alternatif pour l'**épandage** de **fumier**. Cependant, l'impact des applications répétées de **fumier** dans ces pinèdes sur la dynamique écologique du **phosphore** et de l'**azote** n'est pas bien cerné. Liechty *et al.* (2009) ont résumé les résultats de trois études distinctes pour mieux comprendre les effets de l'**épandage** répété de quantités variables de **fumier** appliquées sur des supports différents (forêt de pin Taeda/pâturation) sur la circulation du **phosphore** et de l'**azote** dans le sol et l'eau du sol.

Les applications annuelles de **fumier** augmentaient la quantité de **phosphore** accumulé dans les sols en surface dans les trois études. Cet accroissement était corrélé positivement et linéairement avec le taux et la fréquence des **épandages**. Quand la concentration en **phosphore** du sol est déjà relativement élevée avant l'**épandage**, 5 applications annuelles de 5 t/ha et 20 t/ha provoquent une augmentation de la concentration de cet élément jusqu'à une profondeur de 45 cm sous la surface. Ces teneurs étaient plus importantes dans les sols de surface des pinèdes Taeda que dans les pâtures pour un taux d'application similaire.

L'**azote** dans le sol et dans l'eau (sous ses différentes formes chimiques) était plus faible dans les bois de pin Taeda que dans les pâtures, après deux applications annuelles. Cependant, l'amplitude de l'augmentation en espèces chimiques **azotées** dans l'eau du sol avec **épandage** de **fumier** était plus prononcée pour les pins Taeda que pour les sols des pâtures. Les plantations de pin à torches peuvent constituer une alternative viable aux pâtures comme support pour l'**épandage** de **fumier** dont le taux et la fréquence d'application doivent cependant être raisonnés en tenant compte des cycles de P et N. Les pinèdes étaient plus enclines à accumuler le **phosphore** dans le sol de surface, probablement en raison des applications annuelles répétées (5 tonnes de **fumier**/ha ou plus) qui pouvaient dépasser les besoins de croissance des arbres en **phosphore**. En conséquence cela pourrait conduire à un déplacement du **phosphore** accumulé vers les eaux de surface ou les nappes phréatiques.

Bien que les plantations de pin non traitées présentent de plus faibles concentrations des différentes formes d'**azote** dans le sol et l'eau que les pâtures, l'**épandage** de litière induit une augmentation des nitrates dans le sol et l'eau sous la pinède beaucoup plus forte que dans les pâtures. Ces résultats suggèrent que les plantations de pin Taeda ne devraient apparemment pas être fertilisées avec le **fumier** de **volaille** à la même fréquence que les sols de pâtures, à cause des accumulations potentielles et des pertes subséquentes en **phosphore** et en **azote** dans l'eau.

f) Fraises (*Fragaria fragaria* × *Fragaria ananassa*)

Le **fumier** de **volaille** composté peut être utilisé pour les cultures horticoles comme source de matière et d'**azote** organiques. De récentes études ont indiqué que le **phosphore** n'était pas stabilisé lors du **compostage** et que, présent en excès, cet élément pouvait être libéré dans l'environnement quand l'**engrais** organique était appliqué sur les terres en se basant seulement sur les besoins en **azote** des plantes. Preusch *et al.* (2004) ont comparé, lors d'un essai hors-sol, les effets du **fumier** de **volaille** composté et du **fumier** de **volaille** frais provenant de deux sources différentes sur les concentrations en **azote** et en **phosphore** dans les feuilles de plants de fraises cultivés dans trois types de sol. Six semaines après plantations, les feuilles de fraisiers ayant reçu du **fumier** frais contenaient plus d'**azote** que celles correspondant au groupe **fumier** composté mais cette différence a disparu à 12 semaines. À ce stade, les plants de fraises cultivés dans les sols amendés avec le **fumier** composté avaient une concentration en **phosphore** plus élevée dans les feuilles que ceux qui étaient cultivés dans les sols traités avec le **fumier** frais.

Appliquer du **fumier** de **volaille** composté sur une plante en tenant compte du seul taux d'utilisation de l'**azote** pourrait donc contribuer à une sur-application de **phosphore** et à une absorption plus importante de cet élément par les plants de fraise.

g) Courges

Des aides à la décision sont souvent nécessaires pour identifier les stratégies de gestion appropriées pour répondre à des problèmes agricoles complexes. L'objectif d'Andrews *et al.* (1999) était de développer une telle aide en examinant les potentialités de l'**épandage** de **fumier** de **volaille** sur la courge d'hiver, *Cucurbita maxima*, en visant des buts multiples : améliorer la qualité du sol et de l'environnement, optimiser le recyclage des déchets et augmenter les revenus nets. Parce que les décisions prises au niveau de la ferme sur la gestion des **effluents** peuvent entrer en conflit avec les intérêts communs, l'aide à la décision établit un compromis équilibré entre les options privilégiées par les cultivateurs de courge, les producteurs de **volaille** et les décideurs au niveau de la communauté. L'aide utilise un modèle de simulation qui compare quatre alternatives de gestion du **fumier**:

- le **fumier** de **volaille** frais appliqué pour combler les besoins des cultures en **azote** des cultures,
- le **fumier** de **volaille** frais appliqué pour combler les besoins en **phosphore** des cultures,
- le **fumier** de **volaille** composté appliqué pour combler les besoins en **azote** des cultures,
- le **fumier** de **volaille** composté appliqué pour combler les besoins en **phosphore** des cultures.

Les tests de sensibilité estimaient les **nutriments** potentiellement disponibles dans le **fumier** frais ou composté. Le modèle décisionnel conférait un net avantage à l'emploi du **fumier** de **volaille** composté appliqué pour combler les besoins en **phosphore** des cultures.

En conclusion, les aides à la décision permettent à diverses parties prenantes de comprendre comment interagissent les priorités de chacun et démontrent tout l'intérêt de l'analyse sur le long terme pour évaluer les stratégies de gestion alternatives. La primauté accordée ici au respect des apports en **phosphore** peut s'appliquer à de nombreux autres types de cultures.

h) Champignonnières

Les producteurs canadiens de champignons de Paris ou agarics bispores (*Agaricus bisporus*) utilisent le **fumier** de **volaille** pour augmenter la concentration d'**azote** de leur **compost**. Cependant, dans certains élevages, des **suppresseurs d'ammoniac** sont appliqués sur la litière de **volaille** pendant l'élevage des oiseaux pour diminuer les taux de NH₃ (voir I. D. 1.). Pour déterminer leur impact sur la préparation du **compost** de **fumier** de **volaille** et sur la production de champignons, González-Matute et Rinker (2006) ont fait pousser quatre cultures de champignons à partir de **compost** préparé en utilisant la litière de **volaille** traitée avec un des **suppresseurs d'ammoniac** suivants : un additif acidifiant (le PLTND), un adsorbant de l'ammoniac (le Barn Fresh) ou un additif digestif (l'Impact-P, composé de *Bacillus* et de son de blé), à la concentration de 25,22 kg/100 m², 40 kg/100 m² et 0,49 kg/100 m², respectivement. D'un point de vue général, aucune différence significative n'a été observée entre les différents traitements pour ce qui concerne l'**azote total**, l'ammoniac, le pH, la **conductivité électrique**, les cendres et l'humidité lorsque le **compost** ou l'air environnant était échantillonné pendant la préparation du **compost** à toutes les étapes. Ni les **rendements** ni les quantités de champignons produites n'étaient significativement affectés par la présence de **suppresseurs d'ammoniac** dans la litière de **volaille**.

Donc les champignonnières peuvent utiliser les **fumiers** d'origine avicole amendés avec le PLT, l'Impact-P ou le Barn Fresh sous réserve que ces produits soient employés en respectant les recommandations des fournisseurs.

En conclusion, les débouchés pour l'**épandage** du **fumier** sont pratiquement infinis. Son utilisation à large échelle a été développée sur les cultures de coton dans le Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique, en association avec les **pratiques aratoires anti-érosives** et les **cultures de couverture** en hiver. Pour chaque type de culture, un taux optimal d'apport de **fumier** doit être établi en fonction du **rendement**. Ce taux se traduira cependant parfois par un apport déséquilibré en **nutriments** (notamment, un **amendement** excessif en **phosphore** lorsque le **fumier** sera appliqué pour combler les besoins en **azote** des cultures), ce qui conduira à reconsidérer le taux d'application à la baisse.

4. Conséquences des épandages sur les nutriments et les hormones dans le sol

a) Pollution du sol et des eaux de ruissellement

(1) Azote⁶

Environ 60 % de l'**azote total** du **fumier** de **volaille** est **biodisponible** pour les céréales dès la première année d'application alors que la plupart du **phosphore**, lié à la **matière organique**, est accumulé lors des années successives de culture (Nyakatawa *et al.*, 2001c). Ferguson et Ziegler

⁶ Voir également le Cycle de l'Azote, en Annexe 3.

(2004) rapportent que 50 % de l'**azote** du **compost** de **fumier** sont disponibles la première année d'**épandage**, puis 10 % et 3 % d'**azote** résiduel la 2^{ème} et la 3^{ème} année respectivement.

- Minéralisation de l'**azote**

Deux études portant sur la **minéralisation de l'azote** ont été conduites par Sistani *et al.* (2008b). Le processus de minéralisation de l'**azote** dans le **fumier** de poulet de chair a été évalué par incubation en laboratoire sur trois types de sol (sol limoneux argileux de Brooksville, sol sableux de Ruston au Mississippi, sol terreux de Catlin en Illinois). Dans un second temps, une incubation sur le terrain a permis de quantifier la minéralisation de l'**azote** du fumier de poulet de chair en utilisant des sols et des taux d'application de **fumier** similaires à ceux réalisés lors des expérimentations en salle. Les variations du paramètre humidité du sol n'ont pas d'impact significatif sur l'**azote** non organique issu du **fumier**. L'**azote** minéral augmente rapidement dans le sol. Celui-ci, indépendamment du traitement mis en œuvre, augmentait de 23 mg/kg à t_0 à 159 mg/kg 93 jours après l'application de **fumier**. La quantité d'**azote** inorganique net provenant du **fumier** variait significativement en fonction des types de sols. L'**azote** inorganique net provenant du **fumier** était plus élevé pour le sol argileux suivi du sol sableux puis du sol limoneux. Pour toutes les études et tous les sols, le taux d'ammonium diminuait alors que le taux de nitrates augmentait, indiquant une **nitrification** rapide de l'**azote** minéralisé du **fumier**. La minéralisation du **fumier** dans l'étude sur le terrain évoluait dans le même sens que l'expérimentation de laboratoire mais résultait en une quantité d'**azote** inorganique bien inférieure, sûrement à cause des conditions environnementales mettant en jeu des précipitations et des variations de température, qui pourraient avoir amplifié le processus de **dénitrification** et induit une immobilisation de l'**azote** minéralisé du **fumier**. L'**azote** inorganique dérivé du **fumier** dans l'étude de terrain était en quantité plus importante pour les sols sableux et argileux.

Différents facteurs peuvent influencer le processus de minéralisation de l'**azote**, comme, par exemple la **compaction** du sol par les machines agricoles, laquelle en modifiant ses propriétés physiques peut altérer les processus microbiens, affecter la production agricole et dégrader l'environnement. Pengthamkeerati *et al.* (2005) ont étudié les effets de la **compaction** de la surface sur la minéralisation de l'**azote** dans un sol argileux amendé avec du **fumier** de **volaille** (**fientes** de dinde mélangées avec des copeaux de pin), lors d'une étude de laboratoire complétée par une expérience sur le terrain. Les résultats ont montré que l'**azote** inorganique diminuait d'un facteur 1,8 au maximum, suite à la **compaction** dans l'étude en laboratoire. L'impact du traitement sur un sol amendé avec du **fumier** de **volaille** se traduisait par une multiplication de l'ammonium supérieure à un facteur 7 jusqu'au 28^{ème} jour d'incubation au laboratoire et au début de la saison de croissance du maïs pour l'étude sur le terrain. L'accumulation d'ammonium peut être consécutive à la diminution de l'aération du sol compacté. L'application de **fumier** de **volaille** augmentait la minéralisation de l'**azote** du sol. Dans l'étude de laboratoire, la concentration en **azote** inorganique dans le sol était corrélée négativement avec la **densité volumique** et la proportion de micropores. Ces résultats indiquent qu'à la fois la **compaction** du sol et l'application de **fumier** de **volaille** modifient le taux de minéralisation de l'**azote** dans le sol, et l'amplitude de ces changements est modulée par les variations climatiques.

Motavalli *et al.* (2003a) ont montré que la combinaison des mesures de résistance pénétrométrique du sol avec celles de la **conductivité électrique** apparente du sol (EC_a) pourraient faciliter la détection des changements dans la **densité volumique** du sol ou dans son taux d'hygrométrie. Ces changements sont dus à la **compaction**, aux variations naturelles de la texture du sol et aux effets possibles des **amendements** organiques.

En tenant compte de ces conclusions, Motavalli *et al.* (2003b) ont conduit une seconde étude pour déterminer les effets immédiats et retardés de la **compaction** de surface sur les propriétés physiques du sol, le **rendement** des cultures et la **disponibilité** de l'**azote** dans un sol argileux ; et pour évaluer l'utilisation du **fumier** de **volaille** pour gérer la **compaction** de surface, lors d'un essai sur le terrain. L'ajout de 16 t/ha de **fumier** de dinde diminuait significativement la résistance pénétrométrique du sol à 0-5 cm de profondeur pendant les 2 années de l'étude. La **compaction** de surface réduisait l'**azote** inorganique qu'il y ait ou non apport de **fumier** de dinde. Le **rendement** en ensilage comme en grain tout comme le prélèvement d'**azote** par les plantes augmentaient avec la quantité de **fumier** de **volaille** épandue par ha pendant les 2 années de l'étude.

Ces résultats suggèrent que des **amendements** d'**engrais** organiques, appliqués à des taux agronomiques, peuvent avoir différents effets directs comme à moyen terme sur la **compactibilité** et la réhabilitation des sols argileux, incluant les effets bénéfiques sur les propriétés physiques du sol et la **disponibilité** de l'**azote**.

Enfin, si on étudie les effets de la **compaction** du sol et du **labour** à long terme, l'application de **fumier** de **volaille** dans les systèmes de culture intensifs sans **labour** pourrait augmenter la séquestration de l'**azote** dans le sol par rapport au système de **labour** conventionnel avec fertilisation à base d'**azote** inorganique et réduire ainsi la pollution environnementale. Sainju *et al.* (2008) ont évalué les effets du **labour** sur 10 ans, du système de culture, et des sources d'**azote**. Les effets sur la production des résidus de récolte (tiges et feuilles), la **densité volumique** du sol, et l'**azote total** à 0-20 cm de profondeur dans un sol limoneux au Nord de l'Alabama (Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique) ont été enregistrés. Deux systèmes de culture étaient comparés dans cette étude : la rotation coton-coton-maïs et seigle/coton-seigle/coton-maïs. Ni le système de **labour** adopté ni le type de culture n'influençaient la teneur en **azote total**. L'application de **fumier** de **volaille** ou la pratique des cultures continues peuvent, à long terme, séquestrer l'**azote** dans le sol par rapport à la fertilisation azotée minérale ou à la jachère, améliorant ainsi la qualité et la productivité du sol et diminuant les pertes potentielles d'**azote** par le **lessivage**.

En conclusion, lors des études de laboratoire, le **fumier** de **volaille** fournit de l'**azote** organique qui est rapidement décomposé pour libérer de l'ammonium. Cet ammonium subit une **nitrification** rapide qui conduit au nitrate soit l'espèce azotée absorbée par les végétaux. L'intensité de ce phénomène varie en fonction du type de sol sur lequel le **fumier** est appliqué. Sur le terrain, on retrouve les mêmes résultats, mais la quantité d'**azote** inorganique libéré est moindre. La **compaction** du sol a également une influence importante sur l'**azote** du sol : plus le sol est compact, et plus il contiendra d'ammonium, ce qui peut conduire à des émissions d'ammoniac majorées par la suite. L'**épandage** de **fumier** de **volaille** a un effet double, car il réduit la **compaction** du sol, ce qui bonifie les propriétés physiques et la structure du sol, et il augmente également la minéralisation de l'**azote** et sa **disponibilité**.

- **Lessivage** de l'**azote**

Pour illustrer la problématique du **lessivage** de l'**azote**, l'exemple du Lac Beaver sera utilisé. En 1993-1995, le bassin du Lac Beaver, dans l'Arkansas, aux Etats-Unis d'Amérique, comptait environ 2000 poulaillers qui produisaient en moyenne 200 000 t/an de **fumier** de **volaille** et respectivement 8000 et 4000 t/an d'**azote** et de **phosphore**. La plupart du **fumier** de **volaille** était appliqué sur les terres comme **engrais** pour combler les besoins en **azote** des cultures, rendant l'**azote** excédentaire susceptible d'être lessivé lors de précipitations épisodiques. Les concentrations en **azote** ont été mesurées dans quatre sous-bassins versants des eaux du lac Beaver, un réservoir sur la rivière Blanche, pour évaluer les relations possibles entre l'épandage des effluents avicoles sur les pâtures,

les concentrations en **nutriments** dans les ruisseaux et l'exportation des **nutriments** en excès vers le bassin du Lac Beaver (Haggard *et al.*, 2003). Les échantillons d'eau de surface ont été collectés à 17 reprises pendant 2 années successives à partir de 10 sites localisés sur des ruisseaux à l'intérieur des 4 sous-bassins versants des eaux. Étaient analysés les concentrations en ammonium, de nitrates, d'**azote total Kjeldhal** et d'**azote total**. Les teneurs en nitrates et en **azote total** augmentaient linéairement avec le pourcentage de pâtures localisées sur la ligne de partage des eaux, alors que le coefficient d'exportation d'**azote** augmentait exponentiellement avec l'utilisation de fumure organique sur les pâtures. Les exportations de **nutriments** (kg/an) augmentaient avec la taille du bassin à l'inverse de leur production (kg/km²/an). Cette dernière était de 3 à 10 fois plus élevée que celles observées dans les ruisseaux parcourant les zones non développées ou que la moyenne des mesures réalisées aux Etats-Unis d'Amérique. Il apparaît donc que les pâtures traitées de ce bassin ont un impact manifeste sur les concentrations en **nutriments** dans les ruisseaux et en exportent une certaine quantité dans le lac Beaver et ses affluents. En conclusion, la quantité d'**azote** retrouvée dans les eaux de **ruissellement** dépend directement des quantités de fumier épandues sur les pâtures. Mais d'autres facteurs interviennent également. Sharpley (1997 dans Smith *et al.*, 2007) a étudié l'influence de l'intervalle entre l'épandage de **fumier de volaille** et le premier événement de pluie sur la concentration en **nutriments** dans les eaux de **ruissellement**. Plus l'intervalle entre l'application du **fumier de volaille** et l'occurrence d'une pluie augmente, plus les concentrations d'ammonium et d'**azote total** diminuent ; en revanche aucun effet n'est observé sur la concentration de nitrates.

Nous avons vu que l'**azote** pouvait être lessivé lors de l'épandage sur les terres ; différentes stratégies sont possibles pour limiter ce phénomène. Quelques-unes d'entre elles sont présentées ici. En premier lieu, la présentation même du **fumier** peut influencer le lessivage de l'**azote**.

Eldridge *et al.* (2009) ont mené une étude avec des pluies artificielles sur une gazonnière de cynodon (*Cynodon dactylon*), pour comparer les applications en surface d'un nouveau produit **biosolide granulé** fabriqué à partir de **fumier de volaille** avec l'utilisation de **fumier de volaille** frais (la pratique actuelle de la gazonnière), en termes d'impacts sur la qualité des eaux de **ruissellement**. Les **granulés biosolides** ont été appliqués en surface au taux de 240 kg d'**azote total**/ha, soit à une dose équivalente à la pratique classique employant 18,9 m³/ha de **fumier de volaille**. Une semaine après l'épandage, une pluie artificielle a été appliquée sur chaque parcelle avec une intensité de 90 mm/h pendant une période de 0,5 h, et l'eau de **ruissellement** a été récupérée et analysée. Le **ruissellement** depuis les parcelles traitées avec les **biosolides** présentaient des niveaux moindres d'ammonium et de **salinité** que les parcelles traitées avec le **fumier de volaille**. Ces résultats soulignent l'intérêt de ces **biosolides granulés** comme **engrais azoté** alternatif appliqué en surface sur les gazonnières pour leur risque moindre relatif à la qualité de l'eau de surface, par rapport à l'épandage direct, encore en vigueur, de **fumier de volaille**.

Une autre alternative possible est l'application du **fumier** sous forme de **compost**, qui est souvent utilisé dans les fermes biologiques. La valeur du **compost** appliqué à des taux plus faibles que ceux nécessaires pour répondre aux besoins en **nutriments** des cultures nécessite d'être étudiée puisque l'application de **compost** aux taux agronomiques pour l'**azote** (= taux pour combler les besoins des cultures en **azote**) pourrait ne pas être rentable pour les producteurs de légumes biologiques. Evanylo *et al.* (2008) ont conduit une recherche sur le terrain de 2000 à 2002 dans un **Luvisol** pour comparer les effets de différents mélanges de **composts de fumier de volaille** avec un **engrais** biologique traditionnel (le **fumier de volaille**) et un **engrais** inorganique sur les caractéristiques du sol et la qualité de l'eau dans une rotation de cultures de légumes biologiques. L'**azote total** augmentait de 68 % par rapport au témoin avec l'application de 144 t/ha de **compost** (poids sec) pendant les 3 ans d'étude, contrairement à une application plus économe de **compost** (31 t/ha) qui

n'affectait pas la teneur en **azote** du sol. La minéralisation de l'**azote** du **compost** n'était pas synchrone avec l'assimilation de cet élément par les plants de maïs sucré, résultant en un excès de nitrates dans la zone racinaire exposée à un risque de **lessivage** sans l'utilisation d'une **culture de couverture** (seigle d'hiver) susceptible de capter l'**azote**. Les concentrations en nitrates sous la zone de **labour** excédaient occasionnellement le seuil de 10 mg/L communément retenu comme valeur alerte en santé publique, mais ne différaient pas selon les différents traitements évalués. Malgré l'augmentation des concentrations en **azote** dans l'eau de **ruissellement**, l'application du **compost** en fortes quantités diminuait la quantité d'**azote** qui était lessivé par 5 par rapport à l'**engrais** inorganique, puisque le volume de **ruissellement** était réduit par 4. Les **rendements** des cultures n'étaient pas améliorés par l'**épandage** de **compost** pendant les trois ans d'étude ; cependant, des améliorations de la **densité volumique** et de la **porosité** indiquaient de probables bénéfices à long terme des ajouts à faible taux de **compost**.

Une autre voie développée pour limiter le **lessivage** de l'**azote** est l'**enfouissement** du **fumier** au cours de l'**épandage**. Pote *et al.* (2003) ont montré qu'une technique de coupe manuelle avant d'appliquer le **fumier** sec sous la surface d'une pâture permanente prévenait efficacement la perte de 90 % des **nutriments** lors du **ruissellement** depuis le **fumier** par rapport à une application en surface, et tendait à améliorer le **rendement** fourrager. Cependant cette technique (connue sous le nom de « cerclage en sub-surface ») ne peut pas être utilisée en pratique courante par les producteurs à moins d'être mécanisée. Pour suivre cette voie, Pote *et al.* (2009) ont testé un prototype d'accessoire pour tracteur à une seule lame verticale, conçu pour appliquer le **fumier** de **volaille** sous la surface, à 8 cm de profondeur. Tôt dans la saison, le **fumier** de **volaille** était appliquée à raison de 6,7 tonnes de poids sec /ha sur chaque parcelle (sauf sur 3 parcelles témoins), en utilisant les deux méthodes d'application : **épandage** manuel en surface ou cerclage en sub-surface. Une pluie artificielle (5 cm/h) a généré 20 minutes de **ruissellement** sur chaque terrain qui a ensuite été analysé. Les résultats ont montré que la technique de cerclage en sub-surface combinée à l'application du **fumier** augmentaient le **rendement** fourrager tout en diminuant le volume de **ruissellement** de 50 % et la perte en **azote** d'au moins 90 % par rapport à l'**épandage** en surface. Au final, les pertes de la plupart de **nutriments** et composants du **fumier** dans le **ruissellement** diminuaient de plus de 95 % lorsque le **fumier** était appliqué par le cerclage en sub-surface et s'avéraient statistiquement similaires à celles constatées sur les lots témoins n'ayant pas reçu de **fumier**.

En conclusion, les pratiques d'**épandage** généralisées s'accompagnent d'un **lessivage** de l'**azote**, directement proportionnel aux quantités d'**azote** délivrées lors du traitement de fertilisation. Ce **lessivage** est également fortement influencé par le délai entre l'**épandage** et le premier épisode pluvieux. Plusieurs stratégies sont disponibles pour limiter le **lessivage**, elles consistent en une modification physique du **fumier** (**granulation** ou **compostage**) ou en un **enfouissement** du **fumier** lors de l'**épandage**.

(2) Phosphore⁷

Si on reprend l'exemple du lac Beaver pour le **phosphore** (protocole expérimental décrit en (1), Haggard *et al.*, 2003), on obtient les résultats suivants. Le **phosphore soluble réactif** et le **phosphore total** ont été analysés. La concentration en **phosphore soluble réactif** augmentait linéairement avec le pourcentage de pâtures situées sur le sous-bassin versant, alors que le

⁷ Voir également le Cycle du Phosphore en Annexe 4.

coefficient d'exportation du **phosphore total** augmentait exponentiellement avec l'utilisation des effluents avicoles sur les pâtures. On aboutit donc à la même conclusion que pour l'**azote** : la quantité de **phosphore total** retrouvé dans les eaux de **ruissellement** dépend directement de la quantité épandue sur les cultures. Comme pour l'**azote**, plus l'intervalle entre l'application du **fumier** de **volaille** et la survenue d'une pluie augmente, moindres sont les concentrations en **phosphore total** dans l'eau de **ruissellement** (Smith *et al.*, 2007). Il en serait de même pour la concentration de **phosphore soluble** (Sharpley, 1997 dans Smith *et al.*, 2007).

D'autres facteurs influencent aussi le **ruissellement** du **phosphore**, comme la concentration initiale du sol en **phosphore**. Des études précédentes indiquent que les sols riches en **phosphore** sont associés à des concentrations élevées de cet élément dans les eaux de **ruissellement** issues des champs concernés. Cependant, elles n'ont pas apporté de preuve concernant l'amélioration de la qualité d'une ligne de partage des eaux lorsque les applications de **fumier** sont transférées depuis les sols à taux de **phosphore** élevé vers des sols à taux de **phosphore** bas, à l'intérieur de la même ligne de partage des eaux. Cependant, Pote *et al.* (2003) ont émis l'hypothèse que l'impact d'un apport de **phosphore** est d'autant plus fort sur la concentration de cet élément dans le sol que celui-ci est déjà riche en **phosphore**. Pour tester cette hypothèse, du **phosphore** a été appliqué à raison de 154 mg/kg soit sous forme de **fumier** de **volaille**, soit sous forme inorganique, sur quatre sites dont la concentration en **phosphore extractible dans l'eau** variait de 8 à 69 mg/kg au début de l'expérimentation. Six mois et un an après l'application de **phosphore**, chaque sol était analysé à nouveau pour le **phosphore** extractible de l'eau, et les augmentations des teneurs enregistrées étaient corrélées au niveau de **phosphore** initial du sol. Ces résultats ont confirmé l'hypothèse de départ des auteurs, indépendamment de la source de **phosphore** ou du moment de l'analyse (6 mois ou 1 an). Un modèle mathématique a permis cependant de prédire que de tels résultats ne seraient pas vérifiés dans le cas de sols très riches ou au contraire très pauvres en **phosphore** avant l'épandage.

Un dernier facteur est susceptible d'agir sur la quantité de **phosphore** dans le **ruissellement**, à savoir l'alimentation des **volailles**, et notamment l'incorporation de phytases dans la ration des **volailles**. Comme nous l'avons vu précédemment, les oiseaux d'élevage reçoivent des phytases dans leur alimentation, afin d'améliorer la digestibilité du P de leur ration (voir I. E. 9. c)). Ces enzymes ont des conséquences sur la composition en **phosphore** du **fumier**. Diverses études ont montré que la supplémentation enzymatique par les phytases réduisait effectivement de 23-30 % le **phosphore** contenu dans le **fumier** de **volaille** sans toutefois affecter la fraction de **phosphore soluble**. L'impact des phytases portait donc sur le **phosphore** organique extractible par le NaOH et le HCl (Guo *et al.*, 2009a). Pour établir les taux d'application agronomiques dans les systèmes de **pratiques aratoires anti-érosives**, la litière de **volaille** amendée au **bisulfate de sodium** de poulets recevant des phytases dans leur aliment a été étudiée par Guo *et al.* (2009a) pour connaître la cinétique de libération de ses **nutriments**. Le **fumier** a donc été placé dans des colonnes PVC (15 cm de diamètre x 25 cm de haut) à une profondeur de 5 cm et soumis à des **lessivages** intermittents avec 600 mm d'eau au total pendant 190 jours. Les concentrations des différents **nutriments** dans le **lixiviat** étaient analysées et la cinétique de leur libération modélisée. Il contenait des hauts niveaux de **carbone** organique dissous (35-11 800 mg/L), d'**azote** (6-2690 mg/L), de **phosphore** (45-225 mg/L) et de potassium (20-6060 mg/L) entre autres. La libération des **nutriments** intervenait principalement dans les cinq premières semaines suivant un modèle exponentiel d'ordre 1. Sous des conditions spécifiques, le **fumier** de **volaille** serait capable de fournir 11,7 kg N/t, 5,4 kg P/t et 3,8 kg K/t. La libération de l'**azote** et du **phosphore** potentiellement disponibles était presque totale après 190 jours de **lixiviation**, mais le même résultat aurait pris 2 ans pour le **phosphore soluble**. L'**azote** retrouvé dans le **lixiviat** était composé de 55,7 % d'**azote** organique

dissous, 42,8 % d'ammonium, et 1,1 % de nitrates. Le **phosphore** libéré se décomposait en 88,0 % de **phosphore** inorganique et 12,0 % de **phosphore** organique.

En considérant les conditions de terrain, l'application en surface d'un **fumier de volaille** répondant aux pré-requis spécifiés dans l'expérimentation, soit 6,6 t/ha recommandés pour les systèmes de **pratiques aratoires anti-érosives** fournirait largement 25,0 kg/ha de **phosphore**, 106,6 kg/ha d'**azote** et 245,5 kg/ha de potassium aux cultures saisonnières.

Comme pour l'**azote**, des solutions sont possibles pour éviter le **lessivage** du **phosphore**. Elles sont communes à celle proposées pour l'**azote** (**granulation**, **compostage** et cerclage en sub-surface). Eldridge *et al.* (2009) ont montré dans leur étude (protocole décrit en (1)) que les échantillons d'eau de **ruissellement** du traitement **fumier de volaille** contenaient 10 fois plus de **phosphores total** (12,3 mg/L contre 1,2 mg/L) et **soluble** (8,3 mg/L contre 0,6 mg/L) que ceux trouvés dans l'eau dérivant des parcelles traitées avec le **biosolide**. La relation entre l'apport total de **phosphore** et les concentrations résultantes de cet élément dans les eaux de **ruissellement** était significativement différentes selon que l'on employait le **biosolide** (*ratio* application de **phosphore**/concentration dans le **ruissellement** = 0,01) ou le **fumier de volaille** (*ratio* = 0,16), reflétant ainsi l'importance de la nature chimique du **phosphore** appliqué. Le **phosphore** du **fumier de volaille** était donc beaucoup plus facilement mobilisé et transporté dans les eaux de **ruissellement** que le **phosphore** du **biosolide**. Pour l'application en surface de ces fumures organiques, la prise en compte du taux de **phosphore** extractible par le bicarbonate constituait un meilleur estimateur du risque de contamination de l'eau par cet élément dans le premier flux de **ruissellement** que le taux de **phosphore total**.

Evanylo *et al.* (2008) ont montré dans leur recherche sur le terrain (protocole décrit en (1)) que le **phosphore** disponible augmentait de 225 % par rapport au témoin avec l'application de 144 t/ha de **compost** (poids sec) pendant les 3 ans d'étude. Malgré l'augmentation des concentrations en **phosphore** dans l'eau de **ruissellement**, l'application du **compost** en fortes quantités diminuait les quantités de **phosphore** lessivé, du fait d'une diminution du volume de **ruissellement**.

Le cerclage en sub-surface (technique et protocole expérimental décrit en (1), Pote *et al.*, 2009) limite également les pertes en **phosphore** dans le **ruissellement** d'au moins 90 % par rapport à l'**épandage** en surface.

En conclusion, le **ruissellement** du **phosphore** dépend de : la quantité de **phosphore** appliqué sur les cultures, du délai entre l'**épandage** et le premier épisode pluvieux, de la concentration initiale du sol en **phosphore** (avant **épandage**), et de l'incorporation ou non de phytases dans l'aliment des **volailles**. Le dosage du **phosphore** extractible par le bicarbonate du **fumier** serait le meilleur indicateur du risque de contamination de l'eau par **ruissellement**. Les stratégies pour limiter le **ruissellement** consistent en une transformation du **fumier** (**compostage** ou **granulation**) ou en un **enfouissement** (cerclage en sub-surface).

(3) Éléments Traces métalliques ⁸(ETM)

La présence d'**éléments traces métalliques** (ETM, anciennement **métaux lourds**) dans les **fumiers** et leurs **composts** peut provoquer des effets néfastes sur la santé animale et humaine. Ils se retrouvent potentiellement tout au long de la chaîne alimentaire du sol, dans les nappes phréatiques, et les plantes. En effet, lorsqu'ils sont appliqués en fonction des besoins des plantes, ils ont un effet

⁸ Voir également le Cycle des Éléments Traces, en Annexe 5.

bénéfique pour leur croissance ; mais s'ils sont appliqués en excès, ils peuvent devenir toxiques. Par exemple, les niveaux toxiques critiques mesurés pour les plantes sont de 60 mg/kg pour le **Mehlich-3Cu** et 120 mg/kg pour le **Mehlich-3Zn** (Sistani *et al.*, 2008a).

De très nombreuses méthodes existent pour doser les **éléments traces** dans le sol et le **fumier**. Toutes ne présentent pas la même fiabilité. Hseu (2004) a mesuré les taux de **métaux lourds** dans les **composts** en utilisant différentes méthodes de digestion afin de déterminer la méthode la plus appropriée pour faire cette analyse. Neuf **composts** de différentes sources, incluant le **fumier** de porc, le **fumier** de **volaille**, les déchets d'alimentation, les déchets de **boues d'épuration**, la farine de soja, les résidus de bois, la poussière d'os frais, les farines d'arêtes de poisson et le guano, ont été sélectionnés avant d'être traités par quatre méthodes afin de déterminer les taux de Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb et Zn par spectrométrie de masse. L'analyse des résultats a indiqué que la procédure à l'acide nitrique était la plus efficace pour extraire le Cd, le Mn et le Ni de la plupart des échantillons de **compost**. Elle était recommandée comme la méthode de choix pour digérer les **composts** dans cette étude, sur la base de l'exactitude du dosage après extraction, du coût et du temps nécessaires à la réalisation de la technique. Pour le **fumier** de **volaille**, les taux obtenus étaient de 6,04 à 7,01 mg/kg pour le cadmium, 4,95 à 15,2 mg/kg pour le chrome, 90,0 à 139 mg/kg pour le cuivre, 237 à 624 mg/kg pour le manganèse, 14,5 à 34,2 mg/kg pour le nickel, 6,00 à 15,9 mg/kg pour le plomb et 628 à 781 mg/kg pour le zinc, en fonction des méthodes de digestion utilisées.

Sur le long terme, les ETM s'accumulent dans le sol. Gupta et Charles (1999) ont mesuré les concentrations des oligoéléments dans les sols de trois fermes agricoles du comté de Wicomico (Maryland, Etats-Unis d'Amérique) fertilisés avec le **fumier** de **volaille**. Ces exploitations avaient un long historique d'**épandage** de **fumier** de **volaille** (15 à 20 ans). Une extraction à l'acide nitrique a été pratiquée sur les échantillons de sol collectés à 60 cm de profondeur. Les mesures par spectrophotométrie d'absorption atomique ont montré que les concentrations en arsenic, cadmium, cuivre et manganèse étaient plus élevées dans les champs qui avaient reçu du **fumier** par rapport aux champs témoins. Celles du plomb et du zinc ne variaient pas significativement avec l'application de **fumier** de **volaille**.

- Arsenic

Les composés arsenicaux ont été utilisés de façon intensive en agriculture aux Etats-Unis d'Amérique, depuis les applications directes comme herbicide, sur les cultures en rang comme le coton jusqu'aux suppléments incorporés dans l'alimentation des animaux. L'utilisation de la roxarsone (acide 3-nitro-4-hydroxyphénylarsonique), composé organique arsenical, comme facteur de croissance et antiparasitaire dans l'alimentation des **volailles** aux Etats-Unis d'Amérique soulèvent des inquiétudes sur les impacts négatifs potentiels de cette molécule pour l'environnement. La roxarsone, majoritairement excrétée sans modification, est partiellement transformée en arséniate (As(V)) et en d'autres espèces arsenicales non identifiées au cours du **compostage** (Gabarino *et al.*, 2003 dans Jackson *et al.*, 2006a). Morrison (1969, dans Brown *et al.*, 2005) a comparé des champs qui avaient reçu du **fumier** de **volaille** contenant 15-30 mg/kg d'arsenic pendant 20 ans. L'emploi de la roxarsone n'augmentait pas significativement la concentration en arsenic du sol ou des cultures ; par contre, on en retrouvait dans l'eau de drainage des champs traités avec le **fumier** à la concentration de 290 µg/L soit une valeur très supérieure au seuil limite recommandé par l'USEPA et fixé à 10 µg/L d'arsenic dans l'eau de boisson.

Une fois excrétée dans la litière par les **volailles**, la roxarsone peut subir diverses transformations. Elle peut être dégradée, biologiquement ou non, en formes inorganiques plus toxiques comme l'arsénite ou l'arséniate Bednar *et al.* (2003) ont testé la stabilité de cette première molécule sur des

lixiviats aqueux de **fumier** sous différentes conditions. Des expériences de laboratoire ont montré que l'arsénite pouvait être obtenu par clivage photolytique de la molécule de roxarsone à pH = 4-8 et que plus le pH était élevé, plus la dégradation de la roxarsone était élevée. De plus, l'intensité de la photodégradation augmentait avec la concentration en nitrates et en **matière organique**, substances fréquemment retrouvées dans les lixiviats aqueux de **fumier de volaille**. De faibles concentrations de **matière organique** (similaires à celles rencontrées dans les rivières aux Etats-Unis d'Amérique, 1-10 mg de **carbone** organique/L) étaient suffisantes pour augmenter le taux de photolyse (Leenheer, 1982 dans Bednar *et al.*, 2003). Cependant, à des concentrations plus élevées (environ 1000 mg de **carbone**/L), similaires à celles retrouvées dans les lixiviats de **fumier de volaille**, la photodégradation était extrêmement lente. Des réactions photochimiques additionnelles oxydaient rapidement l'arsénite clivé en arséniate moins mobile dans le sol et moins toxique. Les modalités de stockage du **fumier de volaille** comme les pratiques d'épandage dans les champs pourraient donc affecter la dégradation de la roxarsone et la mobilisation subséquente des espèces arseniquées inorganiques.

Nous avons vu la photodégradation de la roxarsone dans le **fumier** ; il est également utile de comprendre le devenir des composés arsenicaux lors d'application sur les terres de **fumier de volaille** ; Jackson *et al.* (2006a) ont conduit deux études pour répondre à cette question. Dans la première, un sol Orangeburg (**Ultisol** de la plaine Côtière Atlantique) a été mis en solution avec 20 mg/kg soit d'As(V) soit de roxarsone et incubé à 10 % d'humidité pendant quatre mois. L'arsenic échangeable était périodiquement déterminé par extraction avec l'acide phosphorique (à pH = 3). L'As(V) et la roxarsone montraient des **désorptions** similaires : initialement, environ 70 % de l'arsenic ajouté pouvait être mobile dans l'**Ultisol** et cette proportion chutait à 35 % après quatre mois d'incubation, probablement à cause de réactions de **sorption** lente vis-à-vis de l'**Ultisol** ou d'une transformation de l'arsenic en formes moins échangeables. Dans la deuxième étude, deux échantillons de **fumier de volaille** ont été épandus sous différentes conditions sur le sol Orangeburg à des taux utilisés en agriculture. Les traitements consistaient à ajuster le taux d'humidité à 10 % puis à mesurer après 30 jours l'arsenic soluble dans l'eau, le cuivre, et le **carbone** organique. Les solubilités de l'arsenic et du cuivre étaient plus élevées que pour les échantillons de **fumier** sec. Le fait de réduire en cendres le **fumier de volaille** réduisait les quantités d'arsenic et de cuivre solubles, probablement à cause de la perte de **matière organique** du **fumier** carbonisé et d'une diminution subséquente du **carbone** organique dissous. L'épandage des lixiviats des deux **fumiers de volaille** (humidifiée et carbonisée) résultait en de plus grandes quantités d'arsenic et de cuivre solubles que lorsque le sol était amendé avec une concentration équivalente d'arsenic et de cuivre dissous dans l'eau. Les auteurs ont émis l'hypothèse que l'augmentation de la concentration de **carbone** organique dissous lors des traitements du **fumier de volaille** accroîtrait la solubilité de l'arsenic et du cuivre par des **sorptions** et des **complexations** compétitives, respectivement.

Cette étude montre donc que l'arsenic est capable d'être adsorbé par le sol. Cette **adsorption** est d'autant plus forte que le temps de contact entre le sol et le **fumier** contenant l'arsenic est long. D'autre part, le fait de réduire le **fumier de volaille** en cendre ou d'ajuster son taux d'humidité à 10 % rend l'arsenic et le cuivre plus lessivables que si le **fumier** n'est pas traité.

Nous avons vu que l'arsenic pouvait interagir avec le sol dans les conditions du laboratoire. Qu'en est-il sur le terrain ?

Brown *et al.* (2005) ont enquêté sur les sources (zones démission d'As) et les puits d'arsenic (zones d'accumulation d'As) dans une ligne de partage des eaux agricole dans la vallée de Shenandoah en Virginie, aux Etats-Unis d'Amérique. Des expériences sur différentes parcelles ont été mises en œuvre pour examiner les caractéristiques d'**adsorption** et de biotransformation de la roxarsone dans 2 **horizons** de surface de sol (Ap et Bt). La roxarsone présentait une faible **adsorption** dans les sols

Ap et y était rapidement biotransformée en As(V). Bien que l'**horizon** Bt ait démontré une forte capacité d'**adsorption** de la roxarsone, et pourrait ainsi agir comme un puits pour les espèces d'arsenic, les informations sur l'eau du sol suggèrent que l'arsenic comme l'As(V) étaient mobiles dans l'eau du sol Bt. En revanche, il n'a pas été démontré si la mobilisation était due à des réactions compétitives avec le **phosphore** ou les acides organiques, également présents dans le **fumier**. Ces résultats ont des implications pour le cycle de l'arsenic à l'intérieur des lignes de partage des eaux dans les zones à forte production de **volaille**. Pour les lignes de partage des eaux qui ont subi des années d'**épandage** de **fumier**, les concentrations en arsenic et autres espèces associées seraient atténuées dans les sols par l'**adsorption** par les surfaces minérales, mais une variété de processus géochimiques, comme l'**adsorption** compétitive, pourrait permettre un transport accru de l'arsenic dans les systèmes aquifères. En conclusion, cet article permet de montrer que l'arsenic répandu à la surface du sol *via* le **fumier** de **volaille** est lessivé à travers le sol et peut être adsorbé par les surfaces minérales du sol.

En conclusion, la roxarsone de l'aliment des poulets est excrétée telle quelle dans la litière. Elle y subit ensuite des transformations qui conduisent à la formation d'arsenic. L'arsenic est ensuite lessivable dans le sol, dans lequel il interagit par des phénomènes d'**adsorption** sur les surfaces minérales.

(4) Hormones

Les **fientes** de **volaille** contiennent des hormones sexuelles telles l'oestradiol et la testostérone qui font partie du groupe des « composés perturbateurs endocriniens » que l'on peut détecter dans les eaux de surface. Les concentrations en oestradiol observées dans le **fumier** de **volaille** vont de 14 à 904 ng/kg de poids sec, avec une moyenne de 44 ng/kg (Jenkins *et al.*, 2009 ; Semesh et Shore, 1994 dans Ying *et al.*, 2002). Les hormones stéroïdes peuvent interférer avec le fonctionnement normal du système endocrinien, affectant ainsi la reproduction et le développement de la faune sauvage mais également des plantes (Ying *et al.*, 2002).

Ying *et al.* (2002) ont synthétisé les connaissances actuelles sur le devenir des stéroïdes dans l'environnement. Les oestrogènes naturels comme l'estrone (E1), le 17 β -oestradiol (E2) et l'oestriol (E3) ont tous une solubilité aqueuse d'environ 13 mg/L, alors que les stéroïdes de synthèse, comme le 17 α -éthynylœstradiol (EE2) et le mestranol (MeEE2) ont une solubilité de 4,8 et 0,3 mg/L, respectivement. Ces molécules se lient de façon modérée aux sédiments et seraient dégradées rapidement dans le sol et l'eau. Les stéroïdes oestrogéniques ont été détectés dans les **effluents** d'usines de traitements des lisiers dans différents pays à des concentrations de plus de 70 ng/L pour E1, 64 ng/L pour E2, 18 ng/L pour E3 et 42 ng/L pour EE2. Les concentrations en E2 dans l'eau des rivières du Japon, de l'Allemagne, de l'Italie et des Pays-Bas dépassaient 27 ng/L. Des valeurs de E2 allant de 6 à 66 ng/L ont également été mesurées dans la zone aquifère karstique du Nord Ouest de l'Arkansas. Cette pollution des nappes phréatiques a été associée aux **fumiers** de **volaille** et de bovins appliqués sur les terres.

L'expérience menée par Jenkins *et al.* (2008) va dans ce sens. Il a quantifié le transport de l'oestradiol et de la testostérone à partir d'un sol sableux géré depuis 1991 sans **labour** ou avec **labour** conventionnel sur lequel était appliqué soit du **fumier** de **volaille**, soit un **engrais** conventionnel, sur la base des besoins en **azote** des cultures de maïs, dans le Sud-Est du Piedmont, au Nord Est de la Géorgie. Une pluie artificielle était appliquée pendant 60 minutes sur des parcelles de terrain de 2 x 3 m à un taux constant en 2004 et variable en 2005. Le **ruissellement** était mesuré en continu et des sous-échantillons étaient prélevés pour déterminer les concentrations

du flux pesé en hormones. Des différences de concentration étaient observées seulement pour la testostérone dans les expériences de pluies artificielles quelle que soit l'intensité appliquée, et étaient plus élevées lorsqu'on épandait du **fumier de volaille**. La quantité de testostérone était plus importante sur les parcelles sans **labour** recevant le **fumier de volaille** et soumis à une pluviométrie variable. Les taux d'application de **fumier de volaille** semblaient augmenter les concentrations en testostérone des eaux de **ruissellement** au-dessus des niveaux de base, particulièrement lorsque l'apport était pratiqué sur des terres cultivées sans **labour** préalable.

En revanche, d'autres expériences de terrain vont à l'encontre de ces observations. Jenkins *et al.* (2009) ont testé l'impact potentiel des applications de **fumier de volaille** sur les concentrations d'oestradiol (plus particulièrement de 17 β -oestradiol) et de testostérone dans l'eau de drainage de sub-surface et le **ruissellement** de surface sur des cultures irriguées non labourées ou soumise à un **labour** conventionnel (Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique pour le protocole). Par rapport à un **engrais** conventionnel, le **fumier de volaille** ne provoquait pas d'augmentation de la concentration de ces deux molécules dans les différents prélèvements d'eau soumis à analyse. Des différences significatives étaient cependant observées en fonction du traitement du sol : les concentrations en oestradiol dans le flux pesé étaient plus grandes pour les parcelles non labourées par rapport à celles soumises à un **labour** conventionnel pour l'irrigation de juin contrairement aux résultats qui étaient obtenus, pour les deux molécules cette fois pendant l'irrigation de novembre. Bien que la mise en œuvre ou non d'un **labour** conventionnel semble affecter le transport hydrique des deux hormones, les différences de concentrations mesurées ne semblaient pas avoir un impact environnemental conséquent. En conclusion, d'après cette étude, l'impact de l'**épandage de fumier de volaille** sur l'augmentation des hormones sexuelles dans les eaux de **ruissellement** ou de drainage semble faible.

De même, Jenkins *et al.* (2006) ont essayé de déterminer si les applications de **fumier de volaille** sur des petites lignes de partage des eaux pouvaient contribuer à transférer les hormones sexuelles au sol, et si ces hormones étaient ensuite lessivées. Les auteurs ont donc étudié le devenir et le transport de l'oestradiol et de la testostérone, depuis la surface d'application du **fumier** dans quatre petites lignes de partage des eaux cultivées. Le **fumier de volaille** était dosé pour combler les besoins du millet perle (*Pennisetum glaucum*) en 2000 et du sorgho (*Sorghum bicolor*) en 2001. Le niveau moyen d'oestradiol et de testostérone était de 3,1 et 0,09 ng/ha, respectivement. Le **ruissellement** a eu lieu la première fois sept mois après la première application de **fumier** en 2000 et trois semaines après la deuxième application de **fumier** en 2001. Au taux d'application de l'engrais organique, les concentrations en oestradiol et en testostérone dans le **fumier** ne semblaient pas avoir d'impact sur les concentrations dans le sol et les eaux de **ruissellement**. Les teneurs des hormones sexuelles dans le **fumier** provenant des autres installations de production de poulets de chair sont connues pour être souvent plus importantes que celles du **fumier** que les auteurs ont épandu sur les terres. De plus amples études sur le lien entre les concentrations d'hormones sexuelles dans le **fumier de volaille** et des pratiques opérationnelles sont donc recommandées pour mieux évaluer ce risque spécifique.

En conclusion, les résultats des études sont contradictoires concernant la pollution hormonale liée à l'**épandage de fumier de volaille**. Pour certains, elle contribue à la pollution des eaux de surface, notamment par la testostérone, dans les systèmes sans **labour**. Pour d'autres, son rôle dans la pollution des eaux de surface et de drainage n'est pas significatif.

(5) Conséquences de la pollution des eaux de ruissellement :
eutrophisation des eaux de surface

Les eaux côtières ont subi une augmentation de la prolifération d'algues nuisibles. Dans la dernière décennie, la prolifération périodique de la cyanobactérie toxique *Lyngbya majuscula* a augmenté tant en fréquence qu'en sévérité dans le Sud-Est du Queensland, en Australie, proliférations imputées à l'accroissement des apports de **nutriments** dissous et de **carbone** organique à partir des terres soumises à **épandage**. Une étude *in situ* dans des colonnes d'eau a été conduite par Ahern *et al.* (2008) dans le nord de la baie de Moreton (Baie Deception) en Australie, pour déterminer la réponse en termes de croissance de *L. majuscula* aux ajouts de **phosphore**, d'**azote** et de fer chélaté organiquement. Une analyse de variance montrait que chacun des **nutriments** stimulait la **biomasse** de *L. majuscula* dans les conditions de terrain, avec des effets respectivement maximal induit par le fer chélaté, intermédiaire avec le **phosphore** et plus faible avec l'**azote**. L'ajout simultané des trois **nutriments** entraînait une croissance 18 fois plus élevée que le témoin après 49 jours ; soit 928 g/m² de poids sec de **biomasse** supplémentaire contre 54 g/m² respectivement. Ces résultats montrent que des **nutriments** dissous dans l'eau peuvent promouvoir une croissance exponentielle de cette cyanobactérie. Il semble également que l'ajout de fer et/ou de **phosphore** stimulerait la fixation de l'**azote** par *L. majuscula*, du fait de l'importante **biomasse** obtenue et du taux plus élevé d'**azote** dans les tissus pour les traitements de fer et de **phosphore**. L'enrichissement de l'eau des colonnes avec du **fumier** de **volaille** augmentait aussi substantiellement cette **biomasse**. L'expérience démontre que la limitation ou la réduction des **nutriments** dissous dans les courants, les estuaires et les eaux côtières est parfaitement justifiée ; dans le cas contraire, l'amplitude des efflorescences de *L. majuscula* aura tendance à augmenter dans la baie de Moreton dans le futur.

En conclusion, l'**épandage** généralisé du **fumier** de **volaille** peut conduire à la pollution du sol, mais aussi des eaux de surface (par le **ruissellement** du **phosphore** par exemple) et des nappes phréatiques (par le **lessivage** de l'arsenic par exemple). Le **ruissellement** des **nutriments** provoque l'**eutrophisation** des rivières et des eaux côtières par la prolifération d'algues toxiques (*L. majuscula* en Australie par exemple). On retiendra qu'il est conseillé d'appliquer le **fumier** sur les cultures en se basant sur l'évaluation des besoins en **phosphore** car une application ne tenant compte que de la demande en **azote** conduirait à un apport excessif de **phosphore**. Pour limiter le **ruissellement** des **nutriments** vers les eaux de surface, l'**enfouissement** du **fumier** est une stratégie efficace ; elle s'accompagne cependant d'une érosion importante. Des techniques intermédiaires, comme le cerclage en sub-surface ont donc été développées.

b) Émissions gazeuses lors de l'épandage sur les terres

(1) Ammoniac

La volatilisation de l'**azote** sous forme d'ammoniac représente une perte substantielle de sa valeur comme **engrais** lorsque les **fumiers** sont appliqués sur les terres agricoles. De plus, l'ammoniac libéré peut provoquer des dégâts directs sur l'environnement par ces effets toxiques sur certaines plantes, la modification des phytocénoses, l'**eutrophisation** et l'acidification du sol (Nicholson *et al.*, 2004).

Du **fumier** de poulet a été stocké d'octobre à mai en pile découverte. Les émissions d'ammoniac ont été mesurées par Rodhe et Karlsson (2002) sur cinq périodes distinctes pendant le stockage.

Ensuite, le **fumier** de poulet de la pile non couverte et, en parallèle, des **granulés d'engrais** du commerce incluant le **fumier** de poulet ont été épandus sur les terres arables au taux de 110 kg [N total]/ha. Les émissions d'ammoniac ont été mesurées avec une méthode de concentration à l'équilibre sur des parcelles fertilisées par l'un ou l'autre des **engrais** testés, avec ou sans **hersage** 4 heures après l'**épandage**. Au total, 13,5 % de l'**azote** du **fumier** de **volaille** était perdu après l'**épandage** sans **hersage** et 7,5 % dans les parcelles avec **hersage**. Après **hersage**, aucune émission d'ammoniac n'avait lieu. Il en est de même sur les parcelles fertilisées avec des **granulés**. Le **hersage** devrait avoir lieu le plus tôt possible après l'**épandage** ou au plus tard 4 heures après, pour limiter de moitié les pertes en ammoniac potentielles.

En conclusion, le **hersage** précoce est recommandé pour éviter les pertes en ammoniac au cours de l'**épandage**.

(2) Hémioxyde d'azote (N₂O, oxyde nitreux)

L'**épandage** du **fumier** animal sur les pâtures pourrait augmenter les émissions d'hémioxyde d'**azote** car il fournit un **substrat** riche en **azote** et **carbone biodisponibles**. Ce **carbone** nouvellement ajouté pourrait agir comme un donneur d'électron pour les populations d'**hétérotrophes** dénitrificateurs, favorisant à la fois l'anaérobiose microsite *via* une plus grande consommation microbienne du dioxygène du sol et la **dénitrification** (Sauer *et al.*, 2009).

L'hémioxyde d'**azote**, un co-produit de la fertilisation azotée en agriculture a un **potentiel de réchauffement global** 300 fois plus important que le CO₂, à masse égale ; il est donc particulièrement important de l'intégrer aux mesures de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (Makris *et al.*, 2009).

Les effets potentiellement néfastes de l'hémioxyde d'**azote** sur les herbages, consécutifs à un apport excessif d'**azote**, pourraient être atténués par des pratiques de gestion améliorées. Dans les systèmes de pâture, les impacts combinés des applications de **fumier** de **volaille** et d'une culture de seigle d'hiver sur les émissions d'hémioxyde d'**azote** ne sont pas clairement établis. Sauer *et al.* (2009) ont tenté d'estimer l'amplitude des flux d'hémioxyde d'**azote** à la surface du sol en testant l'influence d'un couvert végétal (seigle d'hiver), l'application annuelle de **fumier** de dinde composté au printemps, ainsi que les conditions météorologiques et divers paramètres du sol. Les flux ont été mesurés sur deux années dans des cuves aérées placées sur une pâture de cynodon (*Cynodon dactylon*) avec un sol argileux modérément bien drainé, situé au Nord Ouest de l'Arkansas, aux Etats-Unis d'Amérique. Pendant les soixante jours qui ont suivi l'application de **fumier** de dinde, les flux d'hémioxyde d'**azote** étaient globalement bien corrélés ($r > 0,82$, $P < 0,05$) avec la concentration en nitrates du sol indiquant une stimulation de la production d'hémioxyde d'**azote**, imputable au **substrat** employé. Les précipitations exerçaient une forte influence sur ces flux. Ainsi des pluies importantes (91 et 32 mm) ont eu lieu six jours avant l'enregistrement des valeurs maximales d'hémioxyde d'**azote** (263 et 290 $\mu\text{g N/m}^2/\text{h}$, respectivement). Les effets des traitements sur les émissions d'hémioxyde d'**azote** étaient significatifs seulement pendant les périodes suivant l'apport de **fumier**, particulièrement dans la seconde année de l'étude. Au printemps 2000, les **amendements** de **fumier** de dinde composté ont résulté en une augmentation par un facteur 1,5 des émissions saisonnières cumulées d'hémioxyde d'**azote**, ce qui était directement associé à un taux de nitrates supérieur dans le sol. Au printemps 2001, les sols recouverts de seigle libéraient significativement moins d'hémioxyde d'**azote** (30 contre 112 mg N/m^2). Pendant l'hiver et le début du printemps, la croissance du seigle réduisait aussi les quantités de nitrates dans le sol et l'eau disponible dans le sol.

Ces résultats suggèrent de combiner **épandage de fumier de volaille** et culture de seigle dont les effets contraires sur les émissions de N₂O pourraient se neutraliser au bénéfice de l'environnement, tout en promouvant la productivité des systèmes de pâtures sous climat tempéré.

(3) Dioxyde de carbone

Les effets de la **compaction** du sol sur ses propriétés physiques peuvent altérer les processus microbiens du sol, incluant le cycle du **carbone**, et affecter en conséquence la production agricole et dégrader l'environnement. Pengthamkeerati *et al.* (2005) ont étudié l'impact de la **compaction** du sol en surface sur la minéralisation du **carbone** dans un sol argileux amendé avec du **fumier de volaille** (protocole expérimental décrit en a) (1)). Les résultats ont montré que les émissions de dioxyde de **carbone** dans le sol diminuaient de plus de 72 %, suite à la **compaction** dans l'étude laboratoire et de 46 % pour le **carbone** dans l'expérimentation de terrain de 2002. L'application de **fumier de volaille** augmentait les émissions de dioxyde de **carbone** du sol du fait de l'adjonction par ce biais de **carbone** disponible. Dans l'étude de laboratoire, la diffusion du dioxyde de **carbone** dans le sol étaient corrélée négativement avec la **densité volumique** et la proportion des micropores. Sur le terrain, la **compaction** du sol de surface provoquait des changements dans le contenu en eau et l'aération du sol, ce qui pourrait avoir eu un effet majeur sur la diffusion du dioxyde de **carbone** du sol. Ces résultats indiquent qu'à la fois la **compaction** du sol et l'application de **fumier de volaille** modifient le taux de minéralisation du **carbone** dans le sol, et que l'amplitude de ces changements est modulée par les variations climatiques.

Si l'on récapitule un certain nombre d'études, l'application de **fumier de volaille** dans les systèmes de culture intensifs sans **labour** pourrait augmenter la séquestration du **carbone** dans le sol par rapport au système de **labour** conventionnel avec fertilisation à base d'**azote** inorganique et réduire ainsi la pollution environnementale. Sainju *et al.* (2008) ont évalué les effets du **labour** sur 10 ans, du système de culture, et des sources d'**azote** (protocole décrit en a) (1)). La concentration en **carbone** organique après 10 ans n'était pas influencée par le type de labourage mis en oeuvre. Il en résultait un taux de séquestration du **carbone** de 510 kg/ha/an avec le **fumier de volaille** par rapport aux 120 à 147 kg C/ha/an avec NH₄NO₃. La combinaison des cultures et de l'apport de fumure organique aboutissait à la séquestration de 730 kg de C/ha/an par rapport à une jachère non fertilisée et non labourée. L'application de **fumier de volaille** ou la pratique des cultures continues peuvent, à long terme, séquestrer le **carbone** dans le sol à un niveau bien supérieur à celui obtenu après fertilisation par le nitrate d'ammonium ou sur des terres en jachère, améliorant ainsi la qualité et la productivité du sol, et diminuant les émissions de gaz à effet de serre.

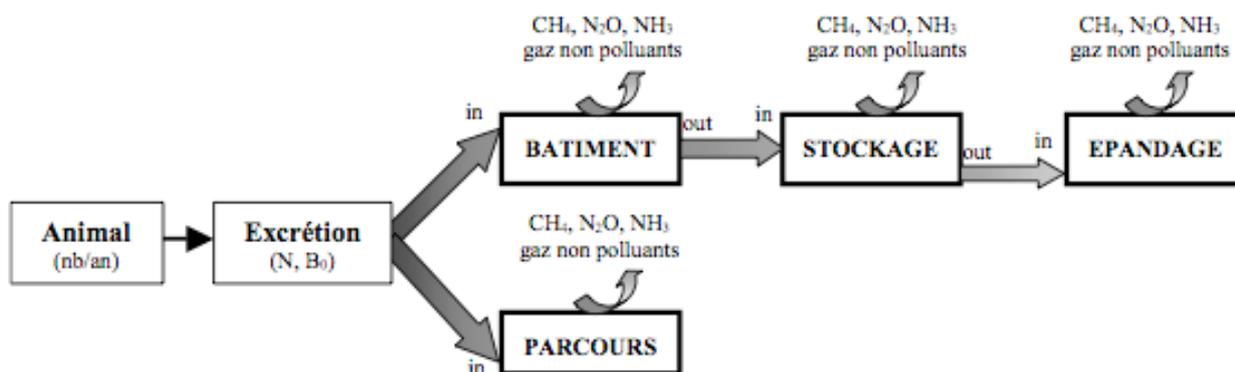
En conclusion, l'application de **fumier de volaille** sur les cultures augmente les émissions de dioxyde de **carbone** du sol. Ce phénomène est aggravé dans les sols compacts. En revanche, si le **fumier** est appliqué sans **labour**, il tend à augmenter la séquestration du **carbone** dans le sol par rapport à l'emploi d'un **engrais** inorganique.

(4) Bilan des émissions gazeuses

Il est désormais admis que sur les 6,4 millions de tonnes d'ammoniac émises en Europe, 70 à 80 % sont imputables à l'élevage. Les bâtiments et le stockage des **effluents** représentent selon les auteurs entre 37 et 41 % des pertes, l'**épandage** entre 40 et 50 % et les animaux sur les pâtures entre 12 % et 16 % des émissions. La **figure 6** présente les différents gaz émis à chaque étape. L'ammoniac volatilisé en France correspond à environ 747 000 tonnes, et selon le CITEPA, la

Bretagne concentrerait à elle seule 19 % de ces émissions soit 142 000 tonnes, dont 99 % d'origine agricole. Le secteur avicole français quant à lui pèserait, selon cet organisme, pour 21 % des émissions françaises d'ammoniac (ITAVI, 2001a).

Figure 6 : calcul des émissions par bilan matière. Gac *et al.*, 2007.



Chez le poulet de chair, les émissions d'ammoniac se répartissent en 28 % pendant la phase d'élevage, 15 % durant le stockage et 57 % au cours de l'**épandage** (Nicholson *et al.*, 2004). L'équilibre global des émissions d'ammoniac des **fumiers** de poules pondeuses pendant l'élevage, le stockage et l'**épandage** se décomposent respectivement en 51 %, moins de 1 % et 48 % (Nicholson *et al.*, 2004). Les stratégies d'abattement seraient théoriquement plus efficaces si elles ciblaient les pratiques d'élevage et d'**épandage**, là où ont lieu les plus grandes pertes de NH₃ tout en réduisant les pertes d'**azote** susceptibles de survenir pendant le stockage et après l'**épandage** sur les terres. La couverture des piles de **fumier** et son **enfouissement** rapide pendant l'**épandage** peuvent contribuer efficacement à la réduction des pertes globales en ammoniac. Le **tableau 11** présente la contribution de chaque type de **volaille** aux émissions gazeuses, pendant l'élevage et le stockage.

En ce qui concerne l'utilisation de **fumier** composté, Kirchmann et Lundvall (1998, dans Kelleher *et al.*, 2002) concluent dans leur étude que le **compostage** des déchets d'origine animale, incluant le **fumier** de **volaille**, devrait être limité à ceux qui ont besoin d'être assainis. Cette conclusion résulte de tests de laboratoire pour étudier l'effet de différents traitements de **fumiers** solides sur les pertes d'ammoniac pendant le stockage et après l'application sur le sol. Le **compostage** émettait significativement plus d'ammoniac que la décomposition anaérobie pendant la phase d'incubation. Cependant, l'application du matériel composté sur le sol résultait en des pertes moindres en ammoniac, puisque les concentrations résiduelles en ammonium étaient faibles. Un abattement important d'ammoniac pourrait être obtenu à condition de sécher les **fientes** avant le stockage ou l'**enfouissement** dans le sol

Tableau 11 : pertes d'azote par volatilisation à l'intérieur des bâtiments par rapport à l'azote excrété. ITAVI, 2001a. (Les taux de pertes incluent celles des bâtiments et celles relatives au stockage).

25 %	Poulets label Pintades label Oies à rôtir
40 %	Volailles de chair sur litière Poules pondeuses Volailles de chair de reproduction Cailles Coquelets Faisans Perdrix
60 %	Canards à rôtir Palmipèdes prêts à gaver Palmipèdes gras Canes de reproduction Cailles de reproduction Chapons Pigeons

La technique Delphi permet de regrouper les évaluations d'un panel d'experts pour améliorer la qualité des prises de décision. L'article d'Angus *et al.* (2003) est une étude de cas entreprise dans ce cadre pour distinguer les meilleures techniques disponibles afin de réduire les émissions d'**azote** d'une unité de production de **volailles** sous la Directive Intégrée de Prévention et de Contrôle de la Pollution (IPPC, pour l'Union Européenne). Les formes d'**azote** concernées incluaient l'ammoniac (NH_3), l'hémioxyde d'**azote** (N_2O), les oxydes d'**azote** (NO_x) et les nitrates (NO_3^-).

L'importance attribuée à chacun des polluants prioritaires a été hiérarchisée en tenant compte des éléments suivants : la contribution de l'ammoniac à l'**eutrophisation**, l'effet refroidissant à l'échelle mondiale de l'aérosol d'ammonium, le rôle de l'ammonium comme vecteur de transport atmosphérique des oxydes d'**azote** et du dioxyde de soufre, la contribution de l'hémioxyde d'**azote** au réchauffement mondial, et le **lessivage** des nitrates. L'**azote** réduit (NH_x) est potentiellement nocif quelle que soit l'échelle considérée, alors que l'hémioxyde d'**azote** et les nitrates étaient considérés comme polluants majeurs à l'échelle mondiale et au niveau local, respectivement. L'étude, en écho avec les préoccupations environnementales majeures, indiquait le besoin impérieux de disposer de techniques d'abattement pour chaque étape de l'élevage de **volailles** et d'une gestion des **effluents**, avec une attention particulière portée à la réduction des émissions d'ammoniac. Les mesures identifiées par le panel d'experts incluaient le maintien d'un faible taux d'hygrométrie de la litière, l'évacuation du **fumier** hors du poulailler avec de faibles émissions (voir II. B.) et son stockage à couvert. Une fois que le **fumier** a quitté la ferme, il devrait être utilisé soit comme biocombustible pour la production d'électricité ou rapidement enfoui dans les sols agricoles. La quantité et le temps d'application du **fumier** devrait être adaptés aux besoins des cultures.

Des incertitudes inhérentes à la technique Delphi limitent sa fiabilité en tant qu'outil unique de prise de décision. Cependant, elle a prouvé son utilité pour identifier les problèmes de polluants

prioritaires, les zones d'accord ou de désaccord, et les points pour lesquels l'information scientifique fait défaut.

En conclusion, à toutes les étapes de la vie de la litière, les émissions gazeuses peuvent être importantes. Il convient d'adopter des pratiques d'abattement pendant l'élevage des **volailles**, l'évacuation du **fumier**, son stockage et son **épandage**. Tout défaut de gestion affectant l'une ou l'autre de ces étapes annulerait l'effet des pratiques d'abattement réalisées en amont. Les émissions qui sont les plus étudiées sont celles d'ammoniac, mais de nombreux autres gaz à effet de serre (notamment le dioxyde de **carbone**, le méthane, les oxydes d'**azote**) devraient faire l'objet d'une attention accrue.

5. Influence des épandages de fumier sur la biodiversité du sol

L'application sur les terres de grandes quantités de fumures issues des productions animales concentrées, sans provoquer de pollution environnementale, est un défi majeur pour l'agriculture du 21^{ème} siècle. L'effet des matières organiques d'origine animale épandues sur les terres sur les concentrations en **nutriments** est bien documenté, mais leur impact sur les populations microbiennes du sol est moins bien compris. Nous tenterons d'éclaircir dans cette partie les effets des **épandages** de **fumier** de **volaille** sur la biodiversité du sol.

a) Bactéries

Jangid *et al.* (2008) ont comparé l'influence de l'**épandage** de **fumier** de **volaille** et d'**engrais** inorganique sur les communautés microbiennes du sol dans trois systèmes de gestion agricole (terre céréalière à **labour** conventionnel, prairies fourragères, prairies pâturées) à celles d'une forêt âgée d'environ 150 ans, près de Watkinsville, en Géorgie. Sur les sols agricoles, l'effet sur les communautés bactériennes, à savoir une altération de leur biodiversité, consécutif à l'apport d'**engrais** était plus important que les conséquences dues à l'érosion de la terre ou aux saisons. L'impact sur les populations bactériennes était plus marqué sur les terres céréalières que sur les pâtures. Les facteurs ayant le plus d'influence sur ces modifications de flore étaient les suivants : le pH du sol, les concentrations en **carbone** et **azote** minéralisables, et la quantité de **nutriments** extractibles. Il existait une relation complexe entre la diversité des communautés bactériennes et l'intensité de l'utilisation de ces agro-écosystèmes. Les pâtures avaient la plus grande diversité bactérienne et pouvaient être caractérisées comme subissant un degré d'intervention intermédiaire comparé à celui, faible, de la forêt et *a contrario* à celui très intense auquel sont soumises les terres céréalières. La diversité bactérienne, plus faible dans les sols amendés avec des **engrais** inorganiques, reflétait une diminution de l'homogénéité de la population bactérienne. En effet, de petites **unités taxonomiques opérationnelles** (Operational Taxonomical Units, OTUs) devenaient de plus en plus abondantes. Ces OTUs étaient spécifiques des modalités d'utilisation des terres ou de l'**engrais** employé, et affiliées aux *Acidobacteria* et *γ -Proteobacteria*, suggérant une adaptation physiologique possible et une sélection écologique de ces groupes de bactéries du fait de l'altération des caractéristiques du sol. La microdiversité des abondantes OTUs, à la fois dans la forêt et les terres céréalières, était réelle : le nombre d'espèces bactériennes similaires phénotypiquement et leur comptage bactérien augmentait pour chaque OTU.

En conclusion, les communautés microbiennes du sol étaient significativement altérées par les systèmes de gestion agricole utilisés sur le long terme et très consommateurs d'intrants de type **engrais**. Ces résultats fournissent une base pour promouvoir les systèmes agricoles conservatoires.

b) Population fongique

Pratt et Tewolde (2009) ont essayé d'évaluer les effets de l'application industrielle de **fumier de volaille**, comme **engrais**, sur les populations fongiques et les composants du sol, dans les fermes de cotonnières du Mississippi. Il s'agissait de déterminer les relations entre les populations fongiques, les constituants nutritifs du sol, la croissance et le **rendement** du coton, sur une période d'évaluation de 5 ans. Dans chacune des deux fermes de l'expérimentation, les niveaux de populations fongiques ont été estimés par dilutions étagées à partir d'échantillons de sol collectés lors de deux périodes de prélèvements pendant deux ans, dans des parcelles soumises à quatre traitements fertilisants répétés : pas d'**engrais**, **engrais** minéral conventionnel, **fumier de volaille** appliqué à faible taux (6,7 t/ha), **fumier de volaille** épandu à fort taux (13,5 t/ha). La saison, l'année ou le type de traitement de fertilisation avaient un effet significatif sur l'importance des populations fongiques dans les deux fermes. La **biomasse** fongique était souvent plus élevée dans les sols amendés avec le **fumier de volaille** (et ce pour les deux niveaux d'application) ou avec l'**engrais** conventionnel, que dans les lots témoins non traités. Dans une exploitation où le **fumier** était enfoui, les niveaux de population augmentaient significativement au cours de l'expérience avec les traitements de **fumier de volaille** et d'**engrais** conventionnel, mais pas pour le lot témoin. De telles variations n'ont pas été observées dans la seconde ferme où le **fumier de volaille** était appliqué sans **labour**. Les numérations de *Fusarium semitectum* et *Penicillium purpurogenum* étaient significativement plus élevées dans les sols traités avec le **fumier de volaille** que chez les témoins sans **engrais** dans une ou deux des quatre périodes d'échantillonnage dans les deux fermes. L'importance quantitative des populations fongiques étaient corrélée significativement avec les concentrations en **azote** des sols d'une part et avec l'**indice d'aire des feuilles**, le taux de chlorophylle, ou le **rendement** du coton d'autre part. Les conclusions majeures à l'issue de cette étude sont :

- qu'aucun effet délétère sur les niveaux de population totale ou de moisissures sélectionnées dans le sol n'a été observé avec l'utilisation de **fumier de volaille** comme **engrais** pour la production industrielle de coton ;
- que les niveaux de population fongique pourraient augmenter à long terme en association avec une plus grande fertilité et une meilleure croissance des plantes induites à la fois par les **engrais** minéraux et les applications de **fumier de volaille**.

En conclusion, le **fumier de volaille**, tout comme les **amendements d'engrais** inorganique, perturbent la microflore bactérienne propre au sol des prairies. Ils favorisent la prolifération des OTUs. Ils augmentent également la population fongique du sol, ce qui contribuerait à une amélioration de la qualité du sol.

6. Conséquences de l'épandage sur la dissémination ou le contrôle des agents pathogènes

a) Bactéries

(1) Entérobactéries et autres bactéries pathogènes

Plusieurs types d'expériences sont possibles pour mettre en évidence le rôle de l'**épandage** de **fumier** sur la dissémination des bactéries pathogènes. Les expérimentations en laboratoire permettent de simuler des conditions météorologiques variables et d'étudier si l'**épandage** joue un rôle significatif ou non dans la dissémination de ces microorganismes, et quels facteurs l'influencent. Les résultats obtenus sont alors vérifiés lors d'essais sur le terrain.

Jenkins *et al.* (2008) ont quantifié le transport des bactéries fécales, et des résidus d'antibiotiques depuis un sol sableux Cecil depuis 1991 (protocole expérimental : Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique). Les **engrais** étaient épandus sur la base des besoins en **azote** des cultures de maïs. Une pluie artificielle était appliquée pendant 60 minutes sur des parcelles de terrain de 2 x 3 m à un taux constant en 2004 et variable en 2005. Le **ruissellement** était continuellement mesuré et des sous-échantillons étaient prélevés pour déterminer les concentrations en bactéries fécales et résidus d'antibiotiques. Ni *Salmonella* ni *Campylobacter*, ni aucun résidu d'antimicrobiens n'ont été détectés dans le **fumier**, le sol, ou le **ruissellement**. Des différences de concentrations des bactéries fécales du sol avant et après les pluies artificielles étaient observées seulement pour *Escherichia coli* dans l'expérience avec intensité de pluie constante. Les quantités totales d'*E. coli* et d'entérocoques fécaux étaient plus grandes pour tous les traitements de **labour** recevant le **fumier** de **volaille** pour l'intensité de pluie variable. Les taux d'application de **fumier** de **volaille** utilisés pour les cultures de maïs semblaient augmenter les concentrations d'*E. coli* dans le sol.

En conclusion, l'**épandage** de **fumier** semble augmenter la concentration en *E. coli* et en entérocoques fécaux dans l'eau de **ruissellement** lors des épisodes de pluie artificielle.

Jenkins *et al.* (2006) ont déterminé si les applications de **fumier** de **volaille** sur des petites lignes de partage des eaux pouvaient contribuer à augmenter le nombre de bactéries fécales dans le sol. Les auteurs ont donc étudié la circulation de ces germes, depuis la surface d'**épandage** dans quatre petites lignes de partage des eaux cultivées. Le **fumier** de **volaille** était appliqué pour combler les besoins du millet perle en 2000 et ceux du sorgho en 2001. Ni *Salmonella* ni *Campylobacter* n'étaient présentes dans le **fumier**, contrairement aux bactéries fécales indicatrices, coliformes totaux, *Escherichia coli* et entérocoques fécaux dont les concentrations dans le **fumier** épandu étaient de 12,2, 11,9 et 12,7 log₁₀ cellules/ha, respectivement. Le **ruissellement** a eu lieu la première fois sept mois après la première application de **fumier** en 2000 et trois semaines après la deuxième application en 2001. Lors du premier **ruissellement** de 2001 (3 semaines après **épandage**), les concentrations en coliformes totaux, *E. coli*, et les entérocoques fécaux dans l'eau de **ruissellement** étaient supérieures aux concentrations de base qui étaient en moyenne de 5,2, 2,9 et 1,1 log₁₀ MPN/100 mL, respectivement. La concentration moyenne de coliformes, entérocoques fécaux et *E. coli* à la surface du sol était de 8,2, 7,9 et 3,5 log₁₀ cellules/kg de sol.

Les concentrations élevées en bactéries fécales observées après le 25 juillet 2001 indiquent que le **fumier** de **volaille** peut avoir un impact sur la concentration bactérienne du **ruissellement** lorsque celui-ci a lieu quelques jours après l'**épandage** de **fumier**.

En conclusion, l'**épandage** de **fumier** se traduit par une plus grande concentration en bactéries fécales pathogènes dans l'eau de **ruissellement**, plus particulièrement si un épisode pluvieux survient dans un laps de temps court après l'**épandage**.

(2) Antibiorésistance et résidus médicamenteux

Comme nous l'avons vu précédemment, l'**épandage** de **fumier** de **volaille** contribue à la dissémination de bactéries fécales dans les eaux de **ruissellement**. Or, parmi ces microorganismes se trouvent des bactéries antibiorésistantes (voir I. C. 1. a) (3)). L'**épandage** sur les cultures peut en conséquence participer à la contamination des eaux de surface par celles-ci. C'est le cas dans l'étude de Futurla *et al.* (2010), où les résidus d'antibiotiques vétérinaires et les *Escherichia coli* antibiorésistants ont été étudiés, pour des poulets de chair recevant une ration médicamenteuse (élevages intensifs) ou non. Cette étude a permis de confirmer la présence de résidus médicamenteux dans le **fumier** de **volailles** à ration médicamenteuse (de 0,77 à 66 mg/L, suivant les molécules) en quantité significativement supérieure au **fumier** de **volailles** du lot témoin. Tous les isolats d'*E. coli* des élevages intensifs étaient multirésistants pour au minimum 7 antibiotiques. La résistance aux β -lactamines (amoxicilline, ceftiofur), tétracyclines et sulfamides étaient les plus répandues. Le **fumier** de poulet de chair représente donc un réservoir potentiel de résidus médicamenteux et d'*E. coli* multirésistants.

b) Champignons et nématodes pathogènes pour les végétaux

Le contrôle biologique d'une large gamme d'agents pathogènes des plantes cultivées par les **amendements** de **fumier** de **volaille** a été observé, mais les résultats sont parfois contradictoires. Le **fumier** de **volaille** diminuait fortement l'incidence de la pourriture des racines de coton causée par *Phytophthora cinnamomi* et celle de la pourriture du pédoncule de maïs due au *Fusarium*, mais limitait faiblement la verticilliose du coton sur le terrain et augmentait la pourriture du pédoncule de maïs causée par *Macrophomina phaseolina*. Cependant, l'**enfouissement** du **fumier** dans le sol réduisait de façon importante la survie de la sclérote à *M. phaseolina* et empêchait la fonte des semences de légumes causée par *Pythium* et *Rhizoctonia*. En revanche, l'**enfouissement** du **fumier** augmente l'incidence des maladies dues à *Rhizoctonia solani* et *Sclerotinia* spp. des arachides et du canola, respectivement (Pratt et Tewolde, 2009).

Les effets des applications continues de **fumier** de **volaille** sur les maladies des racines (causées par *Rhizoctonia solani*, *Pythium* spp., et *Fusarium solani*) et les nématodes sous différentes modalités de **labour** ont également été testés par Sumner *et al.* sur les cultures maraîchères de Géorgie (2002). Contrairement aux pratiques aratoires anti-érosives, l'apport de **fumier** n'avait pas d'influence sur la ramure et la pourriture à l'attache des racines du maïs (induites par une souche de *R. solani*). Le **fumier** de **volaille** composté augmentait les populations de champignons saprophytes dans le sol par rapport au traitement sans **fumier**.

Les nématodes parasites des plantes portent un stylet creux protrusible qui leur permet de transpercer les tissus végétaux. Parmi eux, on trouve *Meloidogyne ingognita* (responsable de la gale des racines), *Paratrichodorus christiei* et *Helicotylenchus dihystera*. La **densité** des populations de nématodes porteurs de stylet était faible dans le sol quel que soit le traitement (type de **labour** et **amendement**) appliqué sur les parcelles. Mais après trois ans de maïs sucré, celle de *M. ingognita*

augmentait avec le **labour** conventionnel par rapport aux **pratiques aratoires anti-érosives**, les populations de *P. christiei* étaient réduites et celles de *H. dihystra* étaient réduites par l'apport de **fumier de volaille**.

En conclusion, les **épandages de fumier** ne semblent pas avoir d'effet majeur sur les populations fongiques responsables des maladies des racines. Un impact est observé sur les nématodes pathogènes : le **fumier** réduit la population de *P. christiei* et de *H. dihystra*

c) Conséquences de l'épandage de fumier sur un écosystème fragile :
l'exemple des Galapagos

La production de **volailles** est une activité économique importante dans les îles de l'archipel des Galapagos (Equateur). Il y a eu un développement récent, à la fois de l'élevage familial (poulet de basse-cour) et de la production de poulet de chair à grande échelle en réponse à la croissance de la population humaine locale et de l'industrie touristique. Cette évolution a généré des inquiétudes sur le risque accru de transfert de maladies des poulets aux espèces locales d'oiseaux des Galapagos qui pourraient présenter une faible résistance aux agents pathogènes nouvellement introduits par le biais des productions avicoles (Wikelski *et al.*, 2004 dans Gottdenker *et al.*, 2005). Gottdenker *et al.* (2005) ont évalué ce risque pour l'avifaune endémique et locale des Galapagos, en se basant sur la preuve empirique que certains agents pathogènes étaient déjà présents chez les poulets des îles et sur une revue littéraire compilant leurs effets potentiels sur les oiseaux sauvages. Les agents pathogènes identifiés dans les populations de poulets domestiques sont le paramyxovirus-1 de la maladie de Newcastle, *Mycoplasma gallisepticum* et le parasite proventriculaire *Dispharynx* sp. La maladie de Newcastle constitue une menace imminente pour les manchots des Galapagos (*Spheniscus mendiculus*), les cormorans aptères (*Phalacrocorax harisi*) et les goélands obscurs (*Larus fuliginosus*), dont les populations actuelles comptent moins de 1500 animaux. De plus, le **fumier** des élevages de poulets de chair pourrait affecter les processus écologiques dans les **écosystèmes** locaux. En effet, il est épandu sur les terres par les éleveurs, ce qui résulte en un enrichissement du sol en **azote** et un **lessivage** des nitrates. Ceci pourrait favoriser la prolifération d'espèces envahissantes comme la mûre (*Rubus* sp.). Par voie de conséquence, la modification des espèces végétales présentes dans l'archipel ou des phytocénoses pourrait affecter la composition de la population d'oiseaux sauvages et leur nidification. Enfin, un **compostage** mal réalisé (chauffage insuffisant) serait susceptible de faciliter la dispersion de bactéries, virus, et parasites aux oiseaux sauvages. Des mesures de biosécurité perfectionnées des élevages de **volailles** sont urgentes et indispensables à mettre en œuvre sur les îles Galapagos afin de gérer les maladies aviaires, ce qui constitue un défi à la fois politique, social et économique dans cette région si particulière.

En conclusion, l'**épandage de fumier** sur les cultures, par la pollution azotée qu'il engendre, peut indirectement nuire à l'équilibre des **écosystèmes** en place, en modifiant la composition et la structure des phytocénoses. Il peut être également à l'origine de la dissémination de bactéries, virus et parasites des **volailles**, pouvant affecter les oiseaux sauvages.

L'**épandage** des **fumiers de volaille** est à l'origine d'une modification de la flore bactérienne des sols (développement des OTUs), et il tend à augmenter la population fongique des sols. Il contribue à la dissémination de bactéries fécales pathogènes, dont la concentration augmente dans les eaux de **ruissellement**. Pour la population fongique, les résultats sont nuancés : le **fumier** épandu permet de diminuer l'incidence de certaines maladies fongiques, tandis que d'autres sont au contraire favorisées. Enfin, le **fumier** épandu permet le contrôle de plusieurs maladies dues aux nématodes.

7. Stratégies disponibles pour réduire les nuisances liées à l'épandage du fumier

a) Charte des bonnes pratiques

Aux Etats-Unis d'Amérique, McIntosh *et al.* (2000) ont étudié les impacts potentiels qui résulteraient de l'obligation de mise en œuvre des bonnes pratiques d'élevage. En premier lieu, cela augmenterait le coût global de la production de **volaille** et donc par voie de conséquence mais de façon transitoire, celui du prix de gros des poulets de chair. Les impacts seraient plus importants si les bonnes pratiques sont basées sur le respect des besoins des cultures en **phosphore**. Ainsi l'impact d'un événement qui augmente les coûts de production provisoirement, comme l'application d'une réglementation contraignante, n'affecterait pas durablement la production de **volaille** ni le prix de gros à long terme. Rinehart (1997 dans McIntosh *et al.*, 2000) souligne que les producteurs américains pourraient être désavantagés vis-à-vis de leurs concurrents sur le marché mondial en cas de réglementation excessive. Mais le modèle industriel de gestion intégrée appliqué au poulet de chair confirme que l'impact de réglementation sur la gestion des **nutriments** dans le sol (N et P) ne constituerait pas une barrière significative à la survie voire à l'expansion de l'industrie avicole.

Les modèles testés semblent indiquer que producteurs et consommateurs peuvent s'adapter à long terme aux impacts des variations de coûts de production consécutifs aux stratégies de gestion du **fumier**. Ces résultats concordent avec une approche volontariste consistant à mettre en œuvre des bonnes pratiques d'élevage. Les producteurs de **volailles** peuvent ainsi s'adapter graduellement et s'ajuster aux standards développés par les experts industriels.

b) Techniques de labour (pratiques aratoires anti-érosives)

Bien qu'elle soit une des cultures les plus rentables pour le Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique, le coton génère une plus grande érosion du sol que toutes les autres cultures annuelles comme le maïs ou le soja (*Glycine max*). Nyakatawa *et al.* (2001a) ont conduit une étude pour estimer le risque d'érosion en fonction des **pratiques aratoires anti-érosives** et de la fertilisation, en Alabama de 1996 à 1998. Le niveau d'érosion du sol dans les parcelles labourées de manière conventionnelle (avec ou sans **culture de couverture** de seigle d'hiver) et fertilisation à base de nitrate d'ammonium étaient le double des niveaux tolérés (11 t/ha/an). Cependant, l'utilisation du **fumier de volaille**, associée à un **labour** conventionnel, résultait en des estimations d'érosion environ 50 % en dessous du niveau de tolérance. Doubler le taux d'**azote** apporté par le **fumier de volaille** sur un système sans **labour** donnait le plus faible niveau d'estimations d'érosion du sol. Les systèmes sans **labour** ou **labour paillis** se traduisaient par des estimations d'érosion faibles correspondant à environ 50 % du niveau de tolérance indépendamment de la mise en place d'une **culture de couverture** ou des modalités de fertilisation azotée.

Cette étude montre que les systèmes sans **labour** ou à **labour paillis** combinés avec une **culture de couverture** et l'**épandage de fumier de volaille** peuvent réduire substantiellement l'érosion du sol tout en accroissant les **rendements** en coton et en fibres de coton ; ces techniques amélioreraient ainsi la durabilité des sols à coton dans le Sud-Est des Etats-Unis d'Amérique. L'**épandage de fumier** associé au **labour** conventionnel est un bon compromis pour éviter le **ruissellement** des **nutriments** tout en diminuant l'érosion.

c) Amendements sur la litière : argile (montmorillonite)

Le **fumier de volaille** riche en **nutriments** fertilisants contient aussi des **oligo-éléments** comme As, Cd, Cu, Pb et Zn, des antibiotiques, des antioxydants, des antifongiques et d'autres composants organiques. Lors de son application sur les cultures, ces **oligo-éléments** peuvent être absorbés par les plantes cultivées, être lessivés vers les nappes phréatiques ou rejoindre le système aquatique comme lixiviat. Il a été démontré que le lixiviat aqueux de **fumier de volaille** pouvait être toxique pour de nombreux organismes (évaluation réalisée sur des organismes marins luminescents, *Photobacterium phosphoreum*) et notamment s'avérer plus dangereux que celui issu de **fumier** d'autres animaux épandus sur les terres agricoles. Les sols argileux sont notamment connus pour retenir les **métaux lourds** toxiques.

Gupta et Gardner (2005) ont mesuré les variations de toxicité (EC_{50}) du lixiviat aqueux de **fumier** en ajoutant un minéral argileux (la montmorillonite). Une diminution significative (124 %) de la toxicité du lixiviat du mélange confectionné était observée après 7 jours par rapport au lixiviat de **fumier de volaille** seul après un jour. Ceci indique que certains des composants du **fumier** ont été **adsorbés** par l'argile.

Pour préciser quels éléments en particulier sont adsorbés par la montmorillonite, Subramanian et Gupta (2006) ont étudié l'effet de l'ajout de montmorillonite sur la réduction de la libération des oligoéléments du **fumier de volaille**. Le cadmium, le cuivre et le zinc libres diminuaient de 29 %, 39 % et 22 %, respectivement, dans le lixiviat aqueux de **fumier de volaille** (1 g de **fumier**) lors de l'ajout de 0,05 g de montmorillonite, mais il n'y avait pas de changement pour les concentrations en cobalt, arsenic et chrome. Le plomb augmentait significativement dans le lixiviat aqueux de **fumier de volaille** en ajoutant 0,2 g de montmorillonite, mais cette augmentation serait liée à l'ajout de montmorillonite et non au **fumier de volaille**. L'étude de **désorption** a montré que la plupart des métaux adsorbés (Cd : 85 %, Cu : 61 % et Zn : 100 %) étaient libérés. Les résultats de cette étude montrent que l'ajout de montmorillonite d'argile résulte en une **adsorption** significative de cadmium et de cuivre du **fumier de volaille**.

L'utilisation de montmorillonite sur le **fumier** permet de réduire la toxicité de son lixiviat. Cette diminution s'explique par une **adsorption** significative des ions cadmium, cuivre et zinc.

En conclusion, plusieurs types de stratégies sont disponibles pour diminuer la toxicité du **fumier**. Les **pratiques aratoires anti-érosives** permettent d'augmenter la productivité des cultures et d'éviter une érosion trop importante, mais elles s'accompagnent aussi souvent de **lessivages** plus importants des minéraux vers les eaux de surface et les nappes phréatiques. Les différents **amendements** sur le **fumier** permettent de réduire les émissions gazeuses au cours du stockage et de l'**épandage** du **fumier** et d'adsorber les **métaux lourds**, évitant ainsi leur **ruissellement** lors des épisodes de pluie. Enfin, imposer une charte des bonnes pratiques d'**épandage** permettrait de limiter la pollution environnementale causée par l'élevage avicole, sans nuire à la rentabilité des élevages à long terme.

B. Décontamination des sols avec les litières de volaille

1. Décontamination des explosifs (DNT sur les terrains militaires)

Les nitrotoluènes sont utilisés dans l'industrie des explosifs, dans la production des colorants et de la mousse de polyuréthane. Le dinitro-toluène (DNT) est fabriqué en mélangeant du toluène et de l'acide nitrique en présence d'acide sulfurique, ce qui résulte dans la formation de 80 % de 2,4-DNT et 20 % de 2,6-DNT. Le 2,4-DNT est hautement réactif et présente un risque explosif tandis que le 2,6-DNT ne s'évapore pas.

Divers microorganismes sont connus pour dégrader le 2,4-DNT par des voies enzymatiques comprenant de nombreux métabolites intermédiaires. L'ajout de **nutriments** stimule le processus de **biodégradation**. La litière de **volaille** constitue un milieu complexe à la fois riche en microorganismes et en **nutriments**. Gupta *et al.* (2004) ont étudié la **biodégradation** du DNT en plaçant la litière de **volaille** dans un milieu aqueux. La dégradation complète de 10 à 50 ppm de 2,4-DNT en solution était observée après deux jours d'interaction avec le **lixiviat** de litière de **volaille** sans formation d'aucun intermédiaire. La dégradation complète du 2,4- et du 2,6-DNT dans un sol contaminé a également été observée en utilisant la litière de **volaille**, après un jour d'interaction (Gupta et Bhaskaran, 2004). Aucune dégradation n'était observée en utilisant du lixiviat de litière de **volaille** stérilisé à l'autoclave.

2. Décontamination du plomb

Divers coproduits organiques ou inorganiques ont été étudiés, comme le **fumier** de **volaille** (Inhat et Fernandes, 1996 dans Hashimoto *et al.*, 2009a) pour leur capacité à immobiliser certains **métaux lourds** dont le plomb dans les sols contaminés. Hashimoto *et al.* (2008) ont utilisé la litière de **volaille** pour fixer le plomb. Cette étude a été réalisée sur un sol doté d'une couverture de végétation locale, ce qui réduisait le volume de lixiviat contenant du plomb. Dans cette étude, l'utilisation de plantes combinée avec l'apport de **fumier** d'origine avicole atténuait le **lessivage** de cet élément et transformait les espèces chimiques de plomb en phases plus stables géochimiquement (**phytostabilisation**).

L'analyse de la transformation d'espèces métalliques cibles en leur produit final requiert l'emploi de technologies de pointe. Hashimoto *et al.* (2009a) ont utilisé la spectrométrie d'absorption de rayons X (EXAFS) associée à une simulation par combinaison linéaire (Linear Combination Fitting, LCF) pour déterminer les espèces de plomb produites et leurs proportions dans les sols pollués traités avec des **amendements** riches en phosphate. Ces sols collectés en limite de champ étaient traités séparément avec du phosphate de calcium, de l'hydroxyapatite synthétisée à partir de déchets

de céramique, et de la litière de **volaille** incinérée. L'efficacité des **amendements** sur l'immobilisation du plomb dont l'indicateur principal était la proportion de chloropyromorphite était maximale avec le phosphate de calcium, intermédiaire avec les déchets de céramique et la plus faible avec la litière de **volaille** incinérée après 380 jours d'incubation. Cette étude indique qu'environ 70 % des espèces de plomb n'était pas immobilisées sous forme de chloropyromorphite, et que le supplément de phosphate amendé a très peu amélioré la formation de ce complexe. La litière de **volaille** permet donc d'immobiliser le plomb dans le sol, mais elle est moins efficace que d'autres **amendements** comme le phosphate de calcium par exemple.

Enfin, Hashimoto *et al.* (2009b) ont tenté d'identifier les mécanismes de l'immobilisation du plomb par la litière de **volaille** incinérée. L'hydroxyapatite intervient dans l'immobilisation du plomb sous forme de chloropyromorphite dans le sol. Le mécanisme prédominant à l'origine de la formation de pyromorphite est la dissolution de l'hydroxyapatite qui entraîne la précipitation de pyromorphite. Les auteurs ont testé si l'hydroxyapatite pure ou synthétisée à partir des coproduits (comme la litière de **volaille**) pouvait être utilisée comme un **amendement** susceptible de fixer le plomb dissous dans un sol en limite de champ, et de modéliser les données cinétiques collectées lors des expériences de dissolution. La concentration en plomb dissous diminuait avec l'ajout des **amendements** aux pH compris entre 3 et 7. Les hydroxyapatites de déchets de plâtre et de litière de **volaille** étaient les plus efficaces pour réduire la dissolution du plomb au-dessus de pH 6.

D'après les modèles cinétiques et le phénomène de dissolution, les **amendements** par les déchets de plâtre et la litière de **volaille** avaient une meilleure capacité de **sorption** du plomb avec des cinétiques plus rapides que l'hydroxyapatite pure à des pH faiblement acides à neutres.

En conclusion, la communauté bactérienne présente dans la litière de **volaille** présente des propriétés intéressantes pour décontaminer certains sols pollués, sans produire de molécules intermédiaires. Elle peut également contribuer, lorsqu'elle est associée aux végétaux, à une **phytostabilisation** du plomb, ce qui évite le **lessivage** de cet élément vers les nappes phréatiques.

Le **fumier** de **volaille**, épandu sur les terres cultivées est une source de **nutriments** bon marché, c'est pourquoi il est très utilisé. Cependant, lorsqu'il est épandu pour répondre aux besoins en **azote** du sol, cela se traduit par un apport de **phosphore** excédentaire qui ruisselle vers les eaux de surface, conduisant à leur **eutrophisation**. Le fait d'apporter du **fumier** composté exacerbe le déséquilibre **phosphore/azote**. L'**épandage** de **fumier** contribue aussi à la pollution par les **éléments traces** ; il est à l'origine d'une modification de la flore bactérienne du sol, et permet le contrôle de certaines maladies des racines. Les **pratiques aratoires anti-érosives** combinées avec l'**épandage** de **fumier** permettent de limiter l'érosion et la **compaction** du sol, mais elles s'accompagnent aussi d'un **ruissellement** plus important des minéraux vers les eaux de surface. Enfin, la litière de **volaille** peut être utilisée de façon plus anecdotique pour dégrader le DNT dans les sols contaminés ou pour participer à la **phytostabilisation** du plomb.

IV. ALTERNATIVES A L'EPANDAGE POUR LE RECYCLAGE DES LITIERES

A. La litière, aliment

1. Incorporation de la litière dans la ration alimentaire du bétail

Depuis les années 1950, la litière de **volaille** est donnée comme aliment aux ruminants (Rankins Jr *et al.*, 2002). La première publication dans une revue à comité de lecture portant sur ce sujet est parue dans le Journal of Animal Science en août 1955 sous la plume de Noland *et al.*, de l'université d'Arkansas. Leur conclusion, à l'issue de deux expériences était que ce produit constituait une source acceptable de protéines pour les brebis en gestation ou en lactation ainsi que pour les taurillons à l'**engrais**. De la même façon, les élevages de bovins dans le Sud des Etats-Unis d'Amérique étaient nourris avec la litière de **volaille** depuis les années 1950. Depuis cette publication initiale, la litière de **volaille** a été l'un des co-produits de l'alimentation bovine les plus étudiés.

a) Caractéristiques de la litière en tant qu'aliment

Lorsqu'on échantillonne différentes sources de **fumier** de **volaille**, des variations importantes des taux de **nutriments** peuvent être observées (voir I. G.). Un **fumier** provenant d'une même exploitation et géré de façon identique d'une année sur l'autre peut conserver une qualité nutritionnelle relativement constante (Jeremiah et Gibson, 2003).

(1) Assainissement de la litière en vue de son utilisation en alimentation animale

La litière de poulet de chair est un moyen économique et sûr pour alimenter les bovins lorsqu'elle est traitée de façon appropriée (Carter et Poore, 1996). Son utilisation plus fréquente pourrait accroître la mise à disposition de **nutriments** produits par les exploitants avicoles à destination des éleveurs de bovins et améliorer ainsi les profits de la production bovine.

L'empilement profond de la litière (voir II. C.) constitue la méthode la plus répandue de traitement au cours duquel, la pile de **fumier** s'échauffe détruisant ainsi les agents pathogènes qu'elle pourrait contenir et améliorant sa palatabilité. Pour obtenir une élévation de température appropriée à coeur, la litière devrait contenir 20 à 30 % d'humidité et être empilée sur 6-8 pieds (1,83-2,44 m) de profondeur pendant au moins trois semaines.

Les producteurs de **volaille** sont encouragés à empiler la litière dès après **curage** pour la vendre après assainissement pendant l'hiver à leurs voisins producteurs de bovins.

(2) Influence du type de litière sur sa valeur nutritive

- Nature du **substrat**

Les extrémités pointues des coques de riz peuvent irriter le tractus digestif des ruminants; il faut donc éviter d'utiliser de la litière en contenant. Les propriétaires de poulaillers utilisent des quantités variables de matériaux absorbants pendant le cycle d'élevage que ce soit avant l'arrivée des poussins de un jour ou lors des opérations d'entretien de la litière. Le matériel absorbant seul est un ingrédient à faible valeur nutritive. En revanche, l'adjonction des plumes, des résidus et pertes

d'aliments ainsi que des **fientes de volaille**, améliore considérablement la qualité nutritive de la litière (McKinley *et al.*, 2000).

- Humidité

La gestion des systèmes d'abreuvement est déterminante pour la maîtrise du taux d'humidité de la litière (voir I. E. 7.). Ce paramètre ne varie pas significativement entre la litière fraîche et la litière stockée pendant 6 mois ou plus. Bien que la teneur en eau ne soit pas importante pour évaluer la valeur nutritive du **fumier**, elle détermine la qualité physique de la litière utilisée comme aliment. Au-delà de 25 % d'humidité, un aliment ne se déversera pas facilement dans la mangeoire. En deçà de 12 % d'humidité *a contrario*, la ration sera poussiéreuse et sa palatabilité diminuée pour les vaches (McKinley *et al.*, 2000).

- **Unités nutritives totales**

Les **unités nutritives totales** (UNT) d'un aliment sont calculées à partir de ses teneurs en protéines brutes et fibres brutes. La valeur énergétique de la litière de **volaille** est basse par rapport à celle des céréales. Cependant, une litière contenant 50 % d'UNT est comparable aux foin de qualité faible à moyenne. La litière pourrait donc constituer une source d'énergie pour les vaches de réforme et les vaches allaitantes (McKinley *et al.*, 2000).

- Sources azotées

La litière de **volaille** contient en moyenne 24 % de protéines brutes avec des variations allant de 15 à 38 %. Plus de 40 % des ressources azotées totales se présentent sous forme d'**azote** non protéique correspondant pour l'essentiel à l'acide urique, excrété par les **volailles**. Les jeunes ruminants n'utilisent pas cette source azotée aussi efficacement que les bovins adultes. En conséquence, il est recommandé de ne pas donner de litière de **volaille** aux bovins de moins de 200 kg (McKinley *et al.*, 2000).

Les bovins ont des difficultés pour dégrader les aliments contenant de l'**azote** lié ou insoluble, lequel devient insoluble notamment lorsque les ingrédients surchauffent. Il représente normalement environ 15 % de l'**azote total**, mais peut monter jusqu'à 50 % en cas d'échauffement excessif de la litière.

- Fibres

La litière de **volaille** contient en moyenne 24 % de taux de fibres brutes, principalement représentées par la matrice absorbante (copeaux de pin, sciure de bois ou coques de riz...). La matrice absorbante est la plupart du temps constituée de matériaux finement hachés, à fibres courtes, lesquelles ne peuvent donc pas combler efficacement les besoins en fibres des ruminants, parce que les bovins ont besoin de **fourrages grossiers** pour le bon fonctionnement du rumen. Dès-lors, même si le taux de fibres de la litière est élevé, il est recommandé qu'au minimum 5 % de la ration se présente sous forme de foin ou de **fourrage grossier** (McKinley *et al.*, 2000).

- Minéraux et cendres

La litière de **volaille** est une excellente source de minéraux. Le taux de cendres est un indicateur important de la qualité de la litière. S'il excède 28 % de la matière sèche, elle ne devra pas être distribuée comme aliment aux bovins. Ainsi, les vaches reproductrices nourries avec 80 % de litière de **volaille** et 20 % de céréales consomment-elles 5 fois plus de calcium, **phosphore** et potassium

que nécessaire pour couvrir leurs besoins. La teneur élevée en calcium, qui représente 2 % de la litière, peut être responsable d'une hypocalcémie puerpérale chez les vaches. Ce risque sera diminué en empêchant l'accès des femelles reproductrices à ce type d'aliments avant le vêlage ou en fournissant au moins la moitié de la ration sous forme de **fourrage grossier** ou de foin. Le délai de retrait de la litière de l'aliment avant vêlage n'est pas bien déterminé, mais peut être fixé à 30 jours, si l'on se fie aux études sur l'hypocalcémie puerpérale chez les vaches laitières.

Le calcium, le **phosphore**, le potassium et les oligoéléments représentent environ 12 % des cendres totales de la litière de **volaille**. Il est recommandé de prendre soin de maintenir le taux de cendres le plus bas possible si on destine ce produit à l'alimentation animale (McKinley *et al.*, 2000).

b) La litière dans l'alimentation des bovins

(1) La litière de volaille dans l'aliment des bovins, une pratique controversée

En 1996, les médias « ont mis en lumière » le problème de l'encéphalopathie spongiforme bovine. Actuellement, aux Etats-Unis d'Amérique, il est strictement interdit d'incorporer des protéines issues de mammifères dans les rations des ruminants. Les producteurs de bovins doivent s'engager par écrit et sous serment à se plier à cette obligation. Quelques compagnies productrices d'aliments pour **volailles** recyclent des produits d'origine bovine (notamment l'iléon distal, les racines dorsales de la moelle épinière, le ganglion trijumeau et la rétine sont autorisés dans l'aliment pour **volaille**, soit un ensemble de tissus correspondant à 10 % de l'**infectivité** de l'ESB), des graisses bovines fondues et de la farine d'os dans la ration des poulets de chair. La formulation des aliments au moindre coût et les variations de prix privilégient l'incorporation de ces matières premières dans l'aliment des **volailles**. Par effet rebond, se pose le problème de savoir si alimenter les bovins avec la litière de **volaille** serait autorisé dans le cas où les oiseaux à l'origine du **fumier** auraient été nourris avec de la viande de ruminants et de la farine d'os. La question soulevée concerne également le pâturage direct par les ruminants sur des prairies amendées par des **effluents** d'origine avicole si les oiseaux ont ingéré les matières premières « litigieuses » pendant leur élevage. L'importance cruciale de la fertilisation des pâtures comme solution de recyclage des **effluents** pour l'industrie de la **volaille** pourrait conduire à l'arrêt de l'incorporation des farines animales ou d'os dans l'alimentation des oiseaux si cette pratique conduisait à une interdiction des **épandages** (Rankins Jr *et al.*, 2002).

Alimenter le bétail avec la litière de **volaille** présente d'autres risques potentiels sérieux pour la santé comme ceux provoqués par :

- les maladies causées par les bactéries et les virus,
- les résidus médicamenteux,
- les bactéries antibiorésistantes,
- les **métaux lourds** et autres substances toxiques.

Au-delà du risque d'ESB, le bétail pourrait être exposé à un risque accru vis-à-vis des métaux toxiques présents dans la litière de **volaille**, bien qu'aucune agence fédérale ou Etat ne recherche actuellement leur présence. Les xénobiotiques et leurs résidus contaminant la litière de **volaille**, peuvent contribuer au développement de bactéries antibiorésistantes dans les élevages de ruminants. L'antibiorésistance est un problème sérieux de santé publique qui augmente le nombre total d'infections chez l'homme tout comme leur sévérité, induisant l'instauration de traitements

prolongés, plus coûteux et sanctionnés par des décès chez certains patients. Enfin, les bactéries pathogènes peuvent persister dans l'alimentation des bovins et être disséminées progressivement dans les troupeaux bovins puisque toutes les méthodes de traitement ne les éliminent pas efficacement (Roach *et al.*, 2009).

(2) La litière dans les suppléments d'urée à consommation lente

Dans le rumen des ruminants, les principaux agents dégradant les fibres, les glucides, l'amidon et les protéines de la ration sont des bactéries, des protozoaires et des champignons anaérobies. Une carence en **nutriments** essentiels pour cette microflore complexe affecte la croissance microbienne, réduisant par voie de conséquence la digestibilité et la consommation de l'aliment, d'autant plus que ce dernier est riche en fibres. La première priorité dans l'alimentation des ruminants est donc de s'assurer que les besoins des microorganismes ruminants sont couverts, en fournissant de l'énergie et de l'**azote** non protéique (urée notamment). L'utilisation de l'urée peut varier en fonction de l'environnement ruminal ; l'**azote** est converti *via* l'ammonium en protéines microbiennes qui sont ensuite utilisées par le ruminant. L'apport d'urée sous forme de « bolus » conduit à des pics élevés d'ammonium après le repas, ce qui perturbe l'équilibre de la microflore. C'est pourquoi des suppléments d'urée à consommation lente ont été développés. Ils se présentent souvent sous forme de blocs multinutritionnels, que les animaux consomment sur 8 heures environ. La litière de **volaille** est souvent comprise dans la composition (à hauteur de 10 % environ) de ces suppléments d'urée à consommation lente car elle est facilement disponible et peu coûteuse. Ces produits sont intéressants pour valoriser des **fourrages** pauvres (herbe d'étoile, *Cynodon nlemfuensis* ou herbe de Para, *Brachiaria brizanta*, par exemple) et permettent de diminuer le coût global de la ration (Ortiz *et al.*, 2002).

(3) Quelques exemples d'incorporation à la ration des bovins

Brosh *et al.* (2006) ont déterminé le rôle du **brout** sur le statut nutritionnel et les performances des bovins pâturant sur une zone boisée méditerranéenne en Israël. Le **brout** est un **fourrage** de faible qualité, c'est pourquoi, du **fumier** de poulet de chair était fourni à volonté, en complément pendant la fin de l'été et l'hiver. Consommée en grande quantité, la litière peut provoquer des effets toxiques chez les bovins. Elle peut être néanmoins incorporée à la ration jusqu'à environ 45 % sans avoir d'effets néfastes. Associée au **brout**, elle fournit une ration équilibrée aux bovins.

Des mesures de l'**indice de consommation** et de l'équilibre énergétique ont été entreprises sur six vaches gestantes à la fin de l'été, sur les mêmes animaux lors du vêlage en hiver, enfin après le sevrage à la fin du printemps. La proportion de litière de **volaille** dans la ration consommée était de 37 % à la fin de l'été et 35 % en hiver. Les auteurs ont conclu que la ration de **brout** complétée par la litière de **volaille** permettait d'obtenir des performances comparables à celles des vaches qui pâturent sur des terrains herbacés de la même région.

Muia *et al.* (2000) ont tenté de déterminer l'**indice de consommation**, les variations de poids vif, le **rendement** en lait et les coûts de production du lait de vaches Frisonnes nourries avec du Napier (*Pennisetum purpureum*), à 10 semaines (Napier moyen) ou 15 semaines de maturité (Napier âgé), au Kenya. Le Napier moyen ou le Napier âgé était supplémenté avec des quantités égales de

tournesol ou de litière de **volaille** dans l'expérience 1, alors que dans l'expérience 2, le Napier moyen était consommé avec des quantités croissantes de litière de **volaille**. Nourrir avec du Napier âgé supplémenté ne s'est pas avéré rentable sur le plan économique alors que supplémenter avec la litière de **volaille** a généré des bénéfices plus importants qu'avec le tournesol. Les auteurs ont donc conclu que l'usage de la litière de **volaille** réduirait les coûts de production et améliorerait la production laitière pour les vaches laitières nourries avec du Napier moyen.

De même, pour les taurillons, Muia *et al.* (2001) ont montré que la digestibilité et l'**indice de consommation** optimaux étaient obtenus avec une administration quotidienne de 3,65 kg de litière de **volaille** en complément d'une ration de Napier

En conclusion, l'utilisation de litière de **volaille**, comme beaucoup de co-produits alimentaires, nécessite une certaine technicité de la part de l'éleveur sans doute plus poussée que pour les aliments traditionnels. Un producteur de viande bovine bien informé peut faire des économies substantielles par rapport à ses concurrents en utilisant la litière de **volaille**. L'empilement profond de la matière première sous une feuille de polyéthylène, technique facile à mettre en œuvre et à maîtriser peut générer un produit sûr qui fournira une ration complète lorsqu'il est mélangé avec une source d'énergie et supplémenté avec quelques fibres à tige longue. Les rations peuvent être utilisées pour les vaches reproductrices et les veaux à l'**engrais** sur des périodes longues sans risque ni pour les ruminants ni pour les consommateurs. Les paramètres économiques influenceront l'utilisation future de la litière de **volaille** recyclée dont l'avenir à long terme reste largement subordonné à sa perception et à son acceptation par l'opinion publique.

c) La litière dans l'aliment des petits ruminants

(1) Ovins

- **Disponibilité** du sélénium de la litière

Deux essais ont été conduits par van Ryssen et Mavimbela (1999) pour établir si le sélénium (Se) présent dans la litière de **volaille** était disponible pour les moutons qui consomment ce **substrat**. En effet, le sélénium est présent en quantité importante dans la litière (voir I. G.), plus particulièrement celle des pondeuses et des poulettes. En revanche, la **disponibilité** du sélénium dissous dans l'urine des **volailles** pour les animaux qui consommeraient la litière n'est pas établie. Les carences en sélénium sont responsables chez les moutons de myopathies et de troubles de la reproduction (infertilité, avortement, rétention placentaire, immunodépression etc.). Il est donc important de vérifier si le sélénium contenu dans la litière est assimilable dans la ration et en quantité suffisante pour combler leurs besoins. Les traitements mis en œuvre dans le cadre de cette expérimentation consistaient à tester de la litière pure ou mélangée avec 7,5 % ou 15 % de mélasse. Le premier essai correspondait à une analyse de digestion partielle utilisant la litière de **volaille** contenant 1,0 mg de Se/kg de MS. La technique du double marquage a été utilisée pour suivre le flux de sélénium le long du tractus digestif avec de l'ytterbium et du chrome comme marqueurs de la phase solide et de la phase liquide respectivement. Vingt-huit à 53 % du sélénium de la ration disparaissait entre l'abomasum et l'iléon et entre 2 % et 28 % après l'iléon des moutons. Les différences entre les traitements n'étaient pas statistiquement significatives. La digestibilité apparente du sélénium dans la litière de **volaille** était de 52 %, 47 % et 52 % pour les rations composées à 100 %, 92,5 % et 85 % de litière de **volaille**, respectivement. Dans le second essai, des ovins nourris individuellement

recevaient une ration expérimentale pendant 83 jours. La litière de **volaille** contenait 0,68 mg de Se/kg de MS. Les concentrations de sélénium dans le sang et le plasma augmentaient avec le temps. Lors de l'abattage, les concentrations en sélénium ont été mesurées dans le foie, la corticale rénale et le muscle cardiaque. Même si les moutons consommaient plus d'aliment, et donc de sélénium quand la mélasse était ajoutée, les concentrations de cet élément dans les tissus ne variaient pas quel que soit le traitement. Les foies contenaient 3,1 ; 2,2 et 2,3 mg de Se/kg MS, les corticales rénales 7,2 ; 9,0 et 8,3 mg de Se/kg de MS et les muscles cardiaques 1,35 ; 1,42 et 1,6 mg de Se/kg de MS dans les groupes recevant une ration à 100 %, 92,5 % et 85 % de litière, respectivement. Les auteurs ont conclu que le sélénium présent dans la litière de **volaille** était disponible pour les moutons et qu'il était assimilé.

- Utilisation de la litière comme complément de **fourrages** pauvres

Le foin et l'ensilage d'avoine sont les **fourrages** les plus souvent utilisés dans l'alimentation des ruminants en Tunisie. Cependant, leur valeur nutritive est généralement faible, notamment les protéines brutes sont en trop faibles quantités pour permettre une production optimale lorsque ces **fourrages** ne sont pas supplémentés. Les effets du type d'apport azoté sur la consommation de MS d'ensilage, les paramètres ruminiaux (pH, ammonium, AGV) et la dégradation ruminale de la MS de l'ensilage et de la paille d'avoine ont été étudiés par Mahouachi *et al.* (2003) sur 4 béliers adultes Noirs de Thibar. L'ensilage était donné à volonté dans la ration de base ou supplémenté avec 450 g de MS de concentré **azoté** (25,6 g/kg de MS) et de concentré énergétique (0,8 UFL/kg MS) contenant de la farine de soja, de l'urée ou de la litière de **volaille** comme suppléments azotés.

Par rapport à l'urée, la litière de **volaille** générait un pic d'ammonium plus faible dans le rumen et une consommation plus importante d'ensilage d'avoine. En Tunisie, la litière de **volaille** pourrait être utilisée comme source d'**azote** pour supplémenter l'ensilage d'avoine pour les moutons. C'est un co-produit bon marché et disponible par rapport au concentré de soja, très cher ou à l'urée, qui produit un pic d'ammonium important après le repas.

(2) Caprins

Quarante-huit chèvres bouchères issues de croisements ont été utilisées pour déterminer si les **granulés** de litière de **volaille** pouvaient être incorporés comme source de protéines dans la ration d'animaux en croissance (Jackson *et al.*, 2006b). Les caprins étaient nourris avec une des trois rations suivantes calibrées à 19-21 % de protéines brutes contenant soit 0 % (ration contrôle CON ; n = 18), soit 20 % (20LV ; n = 12), ou enfin 40 % (40LV ; n = 18) de **granulés** de litière de **volaille**. Elles avaient concomitamment un accès illimité à des **granulés** de luzerne. Dans la première expérience, 38 animaux (respectivement 13/12/13 pour les 3 lots) ont été testés. Les chèvres avaient une période d'adaptation de 23 jours. Poids et **indice de consommation** étaient mesurés une fois par semaine pendant 42 jours. Dans l'expérience 2, 10 mâles nourris avec CON ou 40LV (n = 5 par ration) étaient utilisés dans deux essais. Les chèvres étaient placées dans des cages métaboliques et après une adaptation de 3 jours, l'**indice de consommation**, la production d'urine et de fèces étaient mesurés, et les excréments étaient échantillonnés chaque semaine pour déterminer la digestibilité de chaque ration.

Dans l'expérience 1, ni le gain moyen quotidien ni l'**efficacité alimentaire** n'ont été modifiés par le type de ration. Dans l'expérience 2, pour les 2 essais, les digestibilités de la **matière organique** et des protéines brutes étaient similaires quelles que soient les rations. La digestibilité de la matière sèche était supérieure pour la ration de contrôle CON si on la comparait à 40LV. L'ADF et le NDF

étaient plus importants pour 40LV par rapport à CON dans l'essai 1 seulement. La digestibilité était plus élevée pour 40LV que pour CON dans l'essai 2 seulement. Les résultats sont donc nuancés pour le pourcentage d'incorporation des **granulés** de litière, et cette étude ne permet donc pas de proposer une valeur optimale. Ces **granulés** permettent néanmoins de fournir une source adaptée de protéines digestibles pour les lots de chèvres bouchères à court terme.

d) La litière dans l'alimentation des porcs

Les déchets de l'alimentation humaine ont traditionnellement été donnés aux porcs, car ils permettent chez ces animaux des performances optimales lorsqu'ils complètent une ration à base de céréales ou de leurs co-produits. Les déchets de boulangerie constituent une source d'énergie importante avec des faibles taux de protéines et de minéraux. Son association avec des déchets à faible valeur énergétique et fort taux de protéines, comme la litière de **volaille** semble donc une option intéressante pour la valorisation simultanée des deux types de déchets en Corée. Kwak et Kang (2006) ont conduit une étude pour évaluer les effets de l'alimentation traitée en aérobiose et séchée sous vide d'un mélange de déchets de litière de **volaille** et de co-produits de boulangerie pour la finition des porcs, sur les performances, les caractéristiques de la carcasse, la qualité de la viande et un test de panel gustatif. Une ration classique à base de maïs/soja (témoin) a donc été complétée par un mélange de déchets alimentaires à hauteur de 25 % (25 % de mélange de déchets) et 50 % de MS. Les rations étaient données à un total de 45 porcs (poids vif moyen de 69,4 kg) pendant les 8 semaines de la période de finition. Après l'abattage, le muscle *longissimus*, était étudié 24 h *post-mortem* pour analyser la qualité de la viande. Supplémenter la ration de maïs/soja avec le mélange de déchets augmentait l'**indice de consommation** ramené à la matière sèche, n'altérait pas le gain moyen quotidien, diminuait l'**efficacité alimentaire** plus particulièrement pour le traitement à 50 % de mélange de déchets, et réduisait substantiellement le coût des aliments, par rapport à la ration témoin. Alimenter avec plus de 50 % de mélange de déchets n'affectait pas les caractéristiques de carcasse (poids de carcasse, le **rendement** à l'abattage, l'épaisseur du gras de dos et la catégorie de carcasse), la composition en acides gras de la viande, la qualité de la viande (le score de persillage, le pH, la capacité de rétention d'eau, la perte en exsudat, la force de Warner-Bratzler, la perte de cuisson), et les tests du panel gustatif (flaveur, goût, tendreté, jutosité et acceptation globale), par rapport à l'alimentation maïs/soja exclusive. Cependant, la couleur de la viande était plus pâle pour les animaux du premier lot. Ce dernier critère était donc le seul facteur distinctif associé à la consommation de déchets évaluée ici sur des porcs en finition. En conclusion, le mélange de déchets de litière de **volaille** et de co-produits de boulangerie traités en aérobiose et séchés sous vide était similaire à la ration maïs/soja en valeur nutritive chez ces animaux. Il permettrait de réduire le coût de la ration par rapport à la ration témoin jusqu'à 50 % d'incorporation et au-delà, sous réserve que la couleur de la viande ne soit pas un facteur limitant pour sa commercialisation.

2. Acceptation de la viande par le consommateur

Vingt taurillons Holstein ont été aléatoirement et également répartis en deux groupes (traitement et témoin) à un poids moyen de 334,3 kg et ont été nourris avec une ration contenant en moyenne 5 % de **granulés** de litière de **volaille**, pendant l'allotement et la finition (Jeremiah et Gibson, 2003). À la fin de la période de finition, tous les animaux ont été abattus, et la composition, les caractéristiques de cuisson, la palatabilité et l'acceptation par le consommateur de la viande obtenue ont été testées.

Les échantillons traités n'étaient pas distinguables des échantillons de contrôle pour la palatabilité et l'acceptation par le consommateur, indiquant que les suppléments de litière de **volaille** pouvaient être utilisés, lorsqu'ils sont autorisés, dans les rations des lots de bétail sans compromettre les qualités organoleptiques testées ici.

3. Détection de la litière de volaille dans les aliments destinés au bétail

La législation européenne permet l'ajout de certains additifs dans les ensilages destinés à l'alimentation animale, mais en quantité strictement définie. Des méthodes de contrôle ont donc été développées. Les additifs (urée, biuret et litière de **volaille**) présents dans l'ensilage de luzerne, qui correspondent à l'**azote** non protéique, ont été analysés en utilisant une technologie de spectroscopie dans le proche infrarouge (NIRS) et une sonde réfléchissante à distance en fibre optique. González-Martín et Hernández-Hierro (2008) ont montré que cette technique permettait de prédire la présence de litière de **volaille** avec une sensibilité de 100 %, et d'en quantifier la teneur avec un coefficient de corrélation de 0,925 et une erreur standard corrigée de 2,08 %.

Cette étude a permis la prédiction instantanée et simultanée de la présence d'urée, de biuret et de litière de **volaille** dans un ensilage de luzerne, en appliquant une fibre optique directement sur des échantillons de terrain.

4. Additifs pour la litière (L-carnitine)

Les veaux en croissance consomment des **nutriments** azotés en quantité excessive lorsqu'ils sont nourris avec des rations à base de litière de **volaille**, particulièrement riches en **azote** non protéique. Trente-neuf veaux Holstein en croissance ($150,1 \pm 5,5$ kg) ont été utilisés pour déterminer les effets de l'ajout d'acide 3-hydroxy-4N-triméthylaminobutyrique (L-carnitine) sur leurs performances de croissance et sur différents métabolites sanguins et ruminiaux (Bunting *et al.*, 2002). Les veaux étaient allotés en fonction de leur poids vif, et nourris avec l'une des trois rations expérimentales suivantes:

- ration de contrôle protéine à base de maïs, soja et coton,
- ration litière de poulet de chair contenant 55 % de litière de poulet de chair, du maïs, du soja et du coton,
- ration litière à laquelle on ajoute 250 ppm de L-carnitine (LP + C).

La consommation moyenne de MS, le gain moyen quotidien et l'**indice de consommation** sur 42 jours était plus élevés pour les veaux nourris avec la ration de contrôle que pour les veaux avec la ration de litière (avec et sans L-carnitine). Les animaux nourris avec un supplément de L-carnitine avaient un **indice de consommation** 8 % plus faible. Les résultats suggèrent que la supplémentation en L-carnitine pourrait améliorer les performances des veaux nourris avec des niveaux excessifs de matières azotées en diminuant l'**indice de consommation**. La L-carnitine améliore les concentrations de certains métabolites (ammoniac, urée) chez les ruminants en hyperammoniémie car soumis à des apports trop élevés d'**azote** non protéique.

En conclusion, la tendance actuelle est d'incorporer la litière de **volaille** à des compléments alimentaires type « urée à consommation lente », afin d'apporter de l'**azote** non protéique. Elle n'est plus utilisée seule car trop déséquilibrée, quelle que soit l'espèce cible. Aujourd'hui, elle est surtout incorporée aux aliments pour réduire le coût global de la ration et valoriser des **fourrages** pauvres. Enfin, si elle n'est pas traitée de façon appropriée, elle peut transmettre un nombre important d'agents pathogènes (notamment bactéries antibiorésistantes, helminthes...). Chez les ruminants, elle aurait également le potentiel de transmettre le prion de l'ESB si les **volailles** sont nourries avec des aliments contenant de la farine de viande et d'os contaminés. Enfin, elle contient des minéraux essentiels mais qui peuvent devenir toxiques s'ils sont consommés en excès (calcium chez les vaches laitières par exemple).

B. La litière, source d'énergies

L'**épandage** du **fumier** (voir III), peut poser des problèmes de pollution de l'eau et de l'air, notamment par le **phosphore** et l'**azote** qu'il contient. C'est pour cette raison que d'autres méthodes d'utilisation du **fumier** ont été testées, par exemple, son emploi comme **combustible**. En effet, les **combustibles** de **biomasse** sont considérés comme des énergies renouvelables qui n'affectent pas l'équilibre en CO₂ de l'atmosphère.

Les technologies de destruction à haute température des déchets de **volaille** se différencient en fonction de l'atmosphère de réaction : la **combustion** implique la réaction des **substrats** avec du dioxygène ou de l'air ; la **gazéification** correspond à la conversion des déchets en présence d'agents gazéifiants comme H₂O, CO₂ ou l'air en quantités stœchiométriques ; la **pyrolyse** implique la conversion des déchets sous une atmosphère inerte. Le choix de la technique dépend de l'utilisation souhaitée du produit ultime. Par exemple, la **combustion** d'**effluents** de **volaille** est plus adaptée pour produire de la vapeur ou de l'électricité. La **pyrolyse** peut produire du **charbon activé**. Et la **gazéification** des déchets de **volaille** peut produire un gaz **combustible** riche en H₂, utilisable directement dans les moteurs à gaz, les turbines à gaz ou les piles à **combustibles** (Florin *et al.*, 2009).

La **combustion** et la **gazéification** soulèvent néanmoins des difficultés pour l'environnement et la santé en raison des émissions de NO_x, SO_x, H₂S et HCl gazeux associées. Il est possible de réduire ces émissions en travaillant sur la conception des usines et leur fonctionnement, mais avec des conséquences importantes sur leur rentabilité.

1. Calorimétrie de la litière de volaille

Dávalos *et al.* (2002) ont déterminé le **pouvoir calorifique** (ou **énergie massique**) de la litière (poulet de chair, **substrat** non précisé) lors de la **combustion** en utilisant une bombe calorimétrique.

L'**énergie massique** de la litière sèche est de 14 447 kJ/kg ; cette valeur diminue lorsque le taux d'humidité de l'échantillon augmente. Le produit final obtenu après **combustion** contient un ensemble de solides inorganiques représentant approximativement 20 % de la masse initiale ; la **normalité** de la solution acide résiduelle est inférieure à 0,5 N (la solution acide est composée d'un mélange de HNO₃, H₂SO₄ et HCl) ; et la concentration de gaz libérés comme Cl₂ et SO₂ est respectivement d'environ 6 et 4 mg/kg de litière brûlée.

Une litière de **volaille** présentant un taux d'humidité inférieur à 9 % peut brûler sans ajout d'autre **combustible**. Field *et al.* (2005) ont effectué l'analyse élémentaire de 154 échantillons issus de la base BIOBIB (base de données des biocombustibles), parmi lesquels se trouvait de la litière de

volaille (groupe 9). Ils ont également mesuré à l'aide d'une bombe calorimétrique le **pouvoir calorifique supérieur** (PCS) et ont cherché une équation permettant de relier ces deux paramètres. L'équation produite est la suivante :

$$\text{PCS} = 3,55 \text{ C}^2 - 232 \text{ C} - 2230 \text{ H} + 51,2 \text{ C} \times \text{H} + 131 \text{ N} + 20600$$

Avec PCS en kJ/kg, et C, H et N en % massique de la **biomasse** sèche.

Soit pour le groupe 9, les valeurs mesurées étaient :

C = 42,6 %

H = 5,7 %

N = 3,4 %

Ceci correspond à une valeur estimée pour le **pouvoir calorifique supérieur** de 17 300 kJ/kg alors que la mesure expérimentale correspondante était de 15 974 kJ/kg.

Wilson (1972, dans Field *et al.*, 2005) avait proposé un modèle pour les **déchets solides** uniquement :

$$\text{PCS} = 140,96 \text{ C} + 602,14 (\text{H} - \text{O}/8) + 39,82 \text{ S} + 89,29 (\text{H} - \text{O}/8)/2 + 42,74 (\text{O}/2) - 10,40 \text{ N}$$

Soit pour le groupe 9 (O = 32,2 % S = 0,4 %), le PCS estimé serait alors de 7760 kJ/kg.

Les échantillons secs de litière de **volaille** ont un **pouvoir calorifique** classiquement évalué à 13 500 kJ/tonne, soit la moitié de celui du charbon (Abelha *et al.*, 2003).

L'analyse des cendres obtenues lors de la **combustion** fournit également des renseignements intéressants. Faridullah *et al.* (2009) ont comparé les modifications des fractions métalliques (Cu, Mn, Zn, Pb et Ni) enregistrées dans les litières de poulet et de canard après **incinération** dans un four à moufles à des températures comprises entre 200 et 900 °C. L'**incinération** avant application sur les terres peut affecter les formes et les concentrations des oligoéléments du fait de la différence de température appliquée. La litière brûlée présentait de plus faibles concentrations en métaux solubles dans l'eau ou échangeables par rapport aux autres fractions, ce qui pourrait réduire le risque leur transfert depuis le sol vers les eaux de surface. Les concentrations métalliques totales comme celles des autres éléments (Ca, Mg et K) ont également été mesurées. Les résultats ont montré des concentrations métalliques totales globalement plus fortes avec l'augmentation de la température, avec des valeurs plus élevées dans les cendres de litière de poulet que dans celles de canard. Des températures plus hautes diminuaient significativement les niveaux de Mn, Zn et Ni solubles dans l'eau et augmentaient ceux de Cu et Pb. Une grande proportion de ces métaux se trouvait sous forme de carbonate ou résiduelle.

L'utilisation de la litière de **volaille** brûlée comme **amendement** pour le sol pourrait être économiquement rentable et permettrait un recyclage des **effluents** d'origine avicole notamment pour l'**épandage** sur des sols acides. Cette étude préliminaire a permis de fournir un aperçu de la **spéciation** des métaux dans les cendres de litière de poulet et de canard.

En conclusion, la litière de **volaille** a un **pouvoir calorifique supérieur** d'environ 13 500 kJ/t, valeur qui diminue quand le taux d'humidité croît. La **combustion** de la litière à différentes températures modifie le taux et la présentation de certains **nutriments** composant les cendres de la litière.

2. Combustion et co-combustion

La **combustion** et la **co-combustion** font partie des voies alternatives de recyclage du **fumier de volaille**. Elles ont le potentiel de fournir de la chaleur pour chauffer les bâtiments d'élevage d'une part, et des projets à grande échelle incluent la production d'électricité seule ou de chaleur et d'électricité d'autre part. Les systèmes modernes de **combustion** sont représentés par des usines à forte productivité, équipées de dispositifs de nettoyage complexe des gaz produits, qui génèrent de l'électricité et diminuent la quantité de déchets (cendres), limitant ainsi la pollution. Cinq usines principales de **combustion** de litière de **volaille** sont actuellement en activité dans le monde, dont 4 au Royaume-Uni et une aux Etats-Unis d'Amérique. L'usine Fibropower (à Eye, Royaume-Uni), par exemple, génère une production brute de 14 MWe. Elle fournit une production nette de 12,5 MWe à la ligne de 33 kV qui alimente le réseau local. La litière utilisée provenant d'un poulailler de poules reproductrices correspond à un mélange de copeaux de bois, paille et **fientes de volailles**. Les copeaux de bois et la paille améliorent le processus de **combustion** et permettent le contrôle du taux d'humidité. Le fort taux de calcium de la litière produit un effet auto-nettoyant et permet en conséquence de diminuer l'ajout de calcium comme agent nettoyant vis-à-vis des émissions de gaz. L'échappement d'odeurs est limité par l'utilisation de la pression négative. Le **combustible** est alimenté par une chaudière à travers un système de grille à gradins, qui garantit un **temps de séjour** du matériel de 2 s à 850 °C, tuant ainsi les agents pathogènes et empêchant les émissions olfactives. Le système est alimenté par deux grues automatiques qui mélangent la litière des fermes avant de l'acheminer dans les quatre élévateurs. Le **combustible** est ensuite déplacé vers le foyer par le système de grille à gradins. Après la **combustion**, un précipitateur électrostatique est utilisé pour limiter les émissions de poussière.

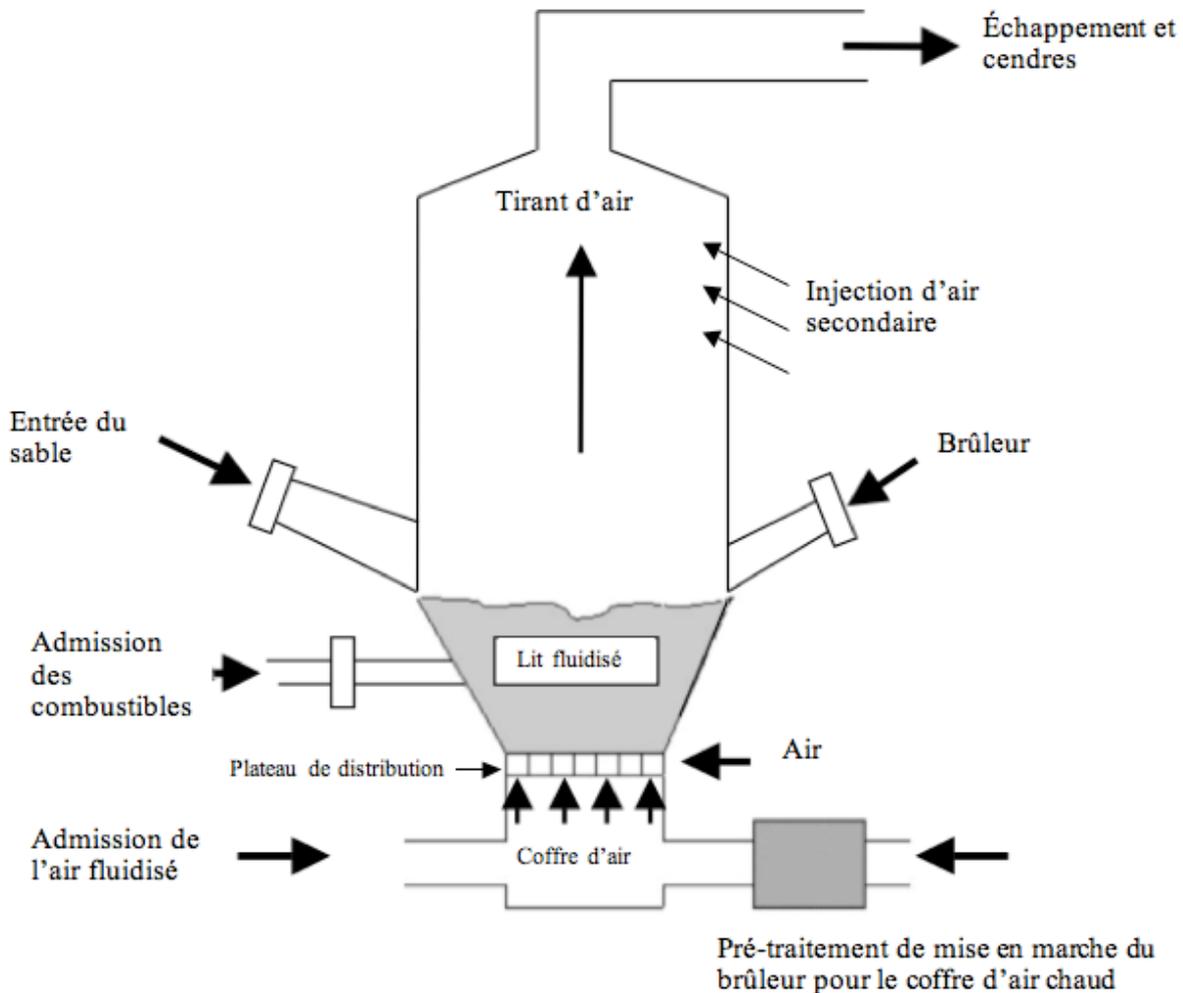
La litière de **volaille** a une température de fusion des cendres basse, ce qui pose problème lors de l'utilisation d'un système de grille de **combustion** conventionnelle (Kelleher *et al.*, 2002). La technologie du **lit fluidisé** a donc été développée pour la construction d'usines électriques utilisant les déchets de **volaille**.

a) En chambre de combustion à lit fluidisé

L'avantage du **lit fluidisé** est qu'il génère un mélange homogène du matériel du lit, ce qui permet des taux de transfert de chaleur de bonne qualité entre les gaz et les solides, et facilite le contrôle de l'uniformité de la température. De plus, le retrait ou l'ajout de solides (par exemple, matériau du lit, catalyseurs et cendres) dans le réacteur est relativement aisé grâce à la fluidité du lit (Higman et Van der Burgt, 2003 dans Florin *et al.*, 2009).

La chambre de **combustion** fonctionne de la façon suivante (*figure 7*) : l'air nécessaire à la **combustion** traverse le fond à **tuyères** et le lit composé d'un mélange de sable et de cendres pour pénétrer ensuite dans le foyer. Après addition du **combustible** (la litière de **volaille**), le mélange formant le lit est soumis à un tourbillonnement si fort qu'il acquiert les propriétés physiques d'un fluide. Le gaz de fumée et le **lit fluidisé** transmettent, par **convection** et par **rayonnement**, la chaleur dégagée par la **combustion** aux surfaces de chauffe de la chambre de **combustion** tourbillonnaire. Les particules solides sont séparées des gaz de fumée dans le **cyclone** situé en aval de la chambre de **combustion** et sont ensuite réintroduites dans cette dernière. Les gaz de fumée sont dirigés vers ce que l'on appelle le deuxième tirage, où ils cèdent leur chaleur aux surfaces de chauffe placées en aval (surchauffeur, réchauffeur d'eau d'alimentation et réchauffeur d'air). L'efficacité de la **combustion** peut être améliorée par l'introduction d'une partie de l'**air secondaire** dans le **tirant d'air** par étages et avec des turbulences (Münchener Rück Munich Re Group, 2004).

Figure 7 : schéma de la chambre de combustion à lit fluidisé. D'après Kelleher *et al.*, 2002.



La co-combustion se définit comme la **combustion** d'un **combustible** renouvelable (la **biomasse**) associé à un **combustible** fossile ou primaire (charbon, gaz naturel, mazout, etc.) (Zhu et Lee, 2005). Les avantages de la **combustion** avec du gaz naturel sont : une diminution du coût des **combustibles** (la **biomasse** est moins chère que les **combustibles** fossiles), une réduction du volume déchets et donc de la pollution du sol, de l'eau et de l'air, et un abattement des émissions de CH_4 , NH_3 , H_2S , des acides organiques volatils et autres composés chimiques car le stockage dure moins longtemps (Sweeten *et al.*, 2003 dans Zhu et Lee, 2005).

La **température axiale** dans le lit et dans le **tirant d'air** comme la **température radiale** sont des indicateurs importants de la performance de **combustion**. Pour la litière neuve, la température atteint $865\text{ }^\circ\text{C}$ dans le lit et demeure élevée dans le **tirant d'air**, ce qui indique que la **combustion** a lieu majoritairement à ce niveau. Pour le **fumier**, l'obtention de la **combustion** complète nécessite plus d'**air secondaire**. Les températures sont principalement affectées par la composition des produits (taux d'humidité et de cendres), le ratio en **air secondaire** et la concentration en **combustible** fossile.

L'efficacité de **combustion** du **carbone** varie surtout avec les taux d'humidité et de cendres dans les déchets, avec le ratio en air supplémentaire, le ratio en **air secondaire** et la hauteur d'injection de l'**air secondaire**.

Zhu et Lee (2005) ont étudié la co-combustion de litière de **volaille**, de **fientes** de **volaille** ou de sciure avec du gaz naturel dans une chambre de **combustion à lit fluidisé**. De même, Henihan *et al.* (2003) ont étudié la co-combustion d'un mélange de litière de **volaille** et de **tourbe** en quantités équivalentes en vue de l'installation d'une usine de **combustion** en Irlande. La co-combustion de la litière de **volaille** seule ou mélangée avec de la **tourbe** à hauteur de 50 % de son poids a été réussie en chambre de **combustion à lit fluidisé**, sous une atmosphère à bullage.

Le principal problème associé à la **combustion** de litière de **volaille** était le taux d'humidité qui influençait son admission dans la chambre de **combustion**. Si le taux d'humidité était supérieur à 25 %, la technique d'introduction par vis ne permettait pas un flux d'admission homogène pour conduire à une **combustion** stable. Cependant, lorsque le taux d'humidité était inférieur à 25 %, il n'était pas indispensable d'ajouter de la **tourbe** pour obtenir une **combustion** complète. La température semblait agir sur la diminution du **carbone** et des hydrocarbures non brûlés, libérés parmi les résidus.

L'efficacité de la **combustion** a été améliorée par l'introduction d'une partie de l'**air secondaire** dans le **tirant d'air** par étages et avec des turbulences. En effet, l'étagement de l'air améliorait la **combustion** en relançant la **combustion** des volatils libérés depuis les résidus dans la colonne de **craquage**. Les quantités de monoxyde de **carbone** (CO) formé diminuaient considérablement quand ces dispositions techniques étaient mises en oeuvre. Dans l'étude de Zhu et Lee (2005), les émissions de CO étaient affectées principalement par l'**excès d'air**. Quand ce dernier augmentait, les émissions de monoxyde de **carbone** diminuaient. L'efficacité de la récupération de chaleur de ce système de **combustion** pouvait atteindre 75 %, dont 70 % étaient récupérés par le premier échangeur de chaleur et 30 % par le second.

L'émission de NO_x est considérée comme le résultat de l'oxydation de l'**azote**, des processus thermiques utilisés et des propriétés hydrodynamiques de la chambre de **combustion**. Plus le **combustible** contient d'**azote** et plus les émissions de NO_x sont importantes. Celles-ci restaient très faibles (inférieures à 140 ppm) pour le mélange **fumier-gaz** naturel même si le matériel brûlé contenait des niveaux élevés d'**azote**. Pour le mélange **fumier-tourbe**, les quantités de NO_x et de N₂O formées dépendaient également des étages d'**air secondaire** et étaient plus faibles que les valeurs d'émissions autorisées avec l'étagement efficace de l'**air secondaire**. La quantité de SO₂ formée était toujours faible car le taux de soufre du **combustible** utilisé était bas et que le calcium dans les cendres retenait le SO₂ dans le mélange **fumier/tourbe**.

Des concentrations relativement importantes en potassium dans la litière et dans les cendres récoltées dans les **cyclones** ont été observées à cause de la paille utilisée comme **substrat** pour la litière. Une forte quantité de chlore dans les **cyclones** a aussi été mesurée.

Les **métaux lourds** avaient également tendance à augmenter dans les **cyclones** et les tests de **lessivage** réalisés avec les cendres des **cyclones** ont montré une légère tendance au **lessivage** (Abelha *et al.*, 2003).

Le système d'utilisation des déchets par la chambre de **combustion à lit fluidisé** est une solution rentable et respectueuse de l'environnement pour traiter la litière de **volaille** et le **fumier**.

Le modèle de dispersion de la **combustion tourbe**-litière sur une unité proposée en Irlande prédisait que les niveaux d'émission seraient inférieurs aux standards de qualité de l'air. Ces résultats

montrent que la co-combustion dans un **lit fluidisé** de litière de poulet et de **tourbe** ou de gaz naturel est non seulement possible mais que les émissions gazeuses subséquentes ne sont pas dangereuses.

Sondreal *et al.* (2001 dans Kelleher *et al.*, 2002) ont conclu que le choix du **combustible** et du type de réacteur pour les nouvelles usines électriques, incluant la **combustion de biomasse**, est influencé par une combinaison de plus en plus complexe de facteurs interdépendants qui incluent :

- les politiques gouvernementales actuelle et future portant sur la restructuration et la réglementation des usines et les incitations environnementales comme les taxes d'émission de **carbone**,
- les facteurs économiques comme la proximité des centres de grande consommation, la stabilité du prix de l'électricité, le montant des capitaux investis dans les nouvelles technologies, les coûts des **combustibles**,
- les technologies existantes (méthodes de contrôle de l'environnement et risques-bénéfices impliqués lors de leur déploiement), ainsi que tout ce qui est dépendant des propriétés du **combustible**.

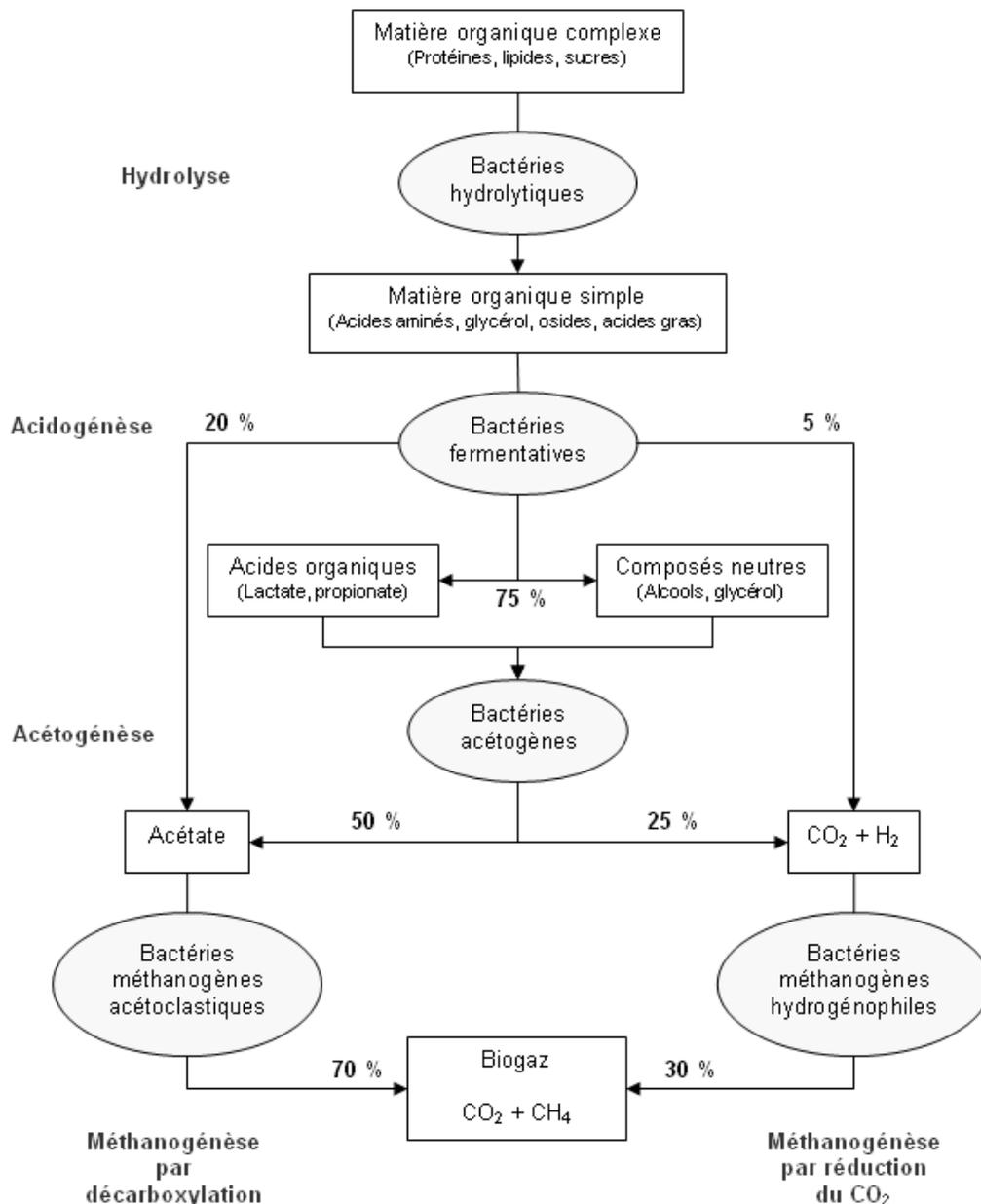
En conclusion, la technologie du **lit fluidisé** permet une **combustion** complète de la litière seule, à condition que le taux d'humidité de cette dernière soit inférieur à 25 %. Au dessus de 25 % d'humidité, la co-combustion avec la **tourbe** est possible. Enfin, l'injection d'**air secondaire** et son étagement sont nécessaires pour réduire les émissions gazeuses au minimum lors de la **combustion**.

3. Biométhanisation, gazéification

a) Biométhanisation

La **biométhanisation** (= **digestion anaérobie**) est utilisée à travers le monde comme un procédé de traitement des déchets industriels, agricoles et urbains. C'est un processus de conversion possible de la litière de **volaille** qui produit un mélange de biogaz récupérables avec un taux moyen de méthane de 60 %. Ce gaz peut être utilisé comme **combustible** pour les chaudières, en remplacement du gaz naturel ou du fuel ou être brûlé dans des générateurs pour produire de l'électricité utilisables par l'exploitation agricole ou destinée à être vendue aux compagnies électriques (Kelleher *et al.* 2002). Les étapes de la **digestion anaérobie** sont expliquées ci-après (*figure 8*). La **matière organique** de la litière est d'abord hydrolysée en métabolites simples ; cette étape est effectuée par des bactéries anaérobies facultatives. Puis différents types de **fermentations** permettent d'aboutir à la formation de biogaz, mélange de méthane et de dioxyde de **carbone** ; cette étape est effectuée par des bactéries aérobies strictes.

Figure 8 : étapes de la digestion anaérobie. Méthanisation.info, 2009.



À cause des interactions complexes entre les différents constituants du consortium microbien, de nombreux facteurs peuvent perturber le processus de **digestion anaérobie**. Une accumulation d'acides gras volatils (AGV) en excès peut ainsi inhiber la méthanogénèse, alors que des fortes concentrations en hydrogène affectent négativement la dégradation acétique du propionate et du butyrate. Le **fumier de volaille** possède une fraction de **matière organique** biodégradable plus importante que les autres déchets d'élevage (Bujoczek *et al.*, 2000). Il contient également des protéines et de l'urée, dont la dégradation libère de l'ammoniac, inhibiteur potentiel de la méthanogénèse. Avec un taux de matière sèche initial de 20-25 %, les performances de biométhanisation du fumier peuvent être diminuées du fait de l'accumulation d'ammoniac. Une correction classique de ce problème vise à diluer le **fumier** jusqu'à 0,5-3,0 % de matière sèche,

éliminant ainsi l'impact négatif de l'ammoniac. Le volume très important à produire en conséquence rend cependant cette méthode caduque d'un point de vue économique.

C'est pourquoi d'autres solutions ont été envisagées pour tenter d'utiliser le **fumier** à forte teneur en matière sèche.

Bujoczek *et al.* (2000) ont réalisé la **digestion anaérobie** de **fumier** de poulet très riche en matière sèche, lors d'un essai portant sur différents lots sélectionnés. Plusieurs mélanges de **fumier** frais et de lisier digéré en anaérobiose ou de **fumier** extrait de fosse à lisier, permettant d'obtenir différentes concentrations initiales de matière sèche, ont été incubés à 35 °C. L'efficacité de la conversion de la **matière organique** en méthane diminuait avec l'augmentation des niveaux organiques dans les réacteurs. Les plus forts taux de matière sèche pour lesquels la digestion était toujours possible étaient autour de 10 %. L'essai utilisant 40 % de **fumier** frais et 60 % de lisier digéré en anaérobiose a abouti à la digestion la plus complète en termes de production de méthane et de taux final en AGV parmi tous les essais expérimentaux proches du seuil de 10 % de matière sèche. Le plus fort rendement en production de méthane a été obtenu avec 100 % de **fumier** frais dilué à 5 % de matière sèche, confirmant ainsi l'effet critique de la dilution sur les performances de digestion. La méthanogénèse a eu lieu pour des concentrations en ammoniac libre allant jusqu'à 250 mg/L. L'efficacité de la conversion de l'**azote** organique en ammoniac et ammonium allant de 62,6 % jusqu'à 80,3 % a été atteinte pour la plupart des digestions.

Différentes stratégies sont possibles pour améliorer le **rendement gazeux** de la **digestion anaérobie**. Tout d'abord, il est possible de mélanger la litière avec d'autres déchets (issus des élevages de porcs ou bovins par exemple). Il est également possible de limiter la quantité d'ammoniac dans le réacteur par différentes méthodes (récupérateur d'ammoniac ou procédé AnammoxND).

La première stratégie consiste à mélanger la litière de **volaille** avec d'autres **effluents** d'élevage. Magbanua Jr *et al.* (2001) ont testé des mélanges d'**effluents** de porc et de **volaille** en proportions variées et en anaérobiose. Les lots qui comportaient les deux types de déchets avaient des **rendements** plus importants en biogaz, jusqu'à 200 ± 30 mL/g de **solides volatils** détruits, et du méthane, jusqu'à 130 ± 20 mL/g de **solides volatils** détruits, par rapport à chaque **effluent** d'origine testé isolément. Ces **rendements** supérieurs démontraient que la co-digestion de ces **substrats** était viable. La complémentarité apparente des deux **effluents** pourrait cependant être artéfactuelle. Les déchets de porc étaient en effet collectés depuis un puisard de drainage et pouvaient contenir une quantité significative de bactéries méthanogènes, alors que le **fumier** de **volaille** était récupéré sur le sol après une exposition à l'air et pouvait héberger une faible population en bactéries anaérobies strictes. De plus, les **effluents** de porc avaient un plus faible taux de matière sèche, de **demande chimique en dioxygène**, et en ammoniac que les déchets de **volaille**. Ainsi, dans les traitements de mélanges, les déchets de porc pourraient avoir apporté les bactéries méthanogènes, tandis que les déchets de **volaille** ont fourni un **substrat** organique complémentaire. Des facteurs supplémentaires qui pourraient avoir inhibé l'activité de méthanogénèse dans le traitement d'**effluents** de **volaille** purs sont le faible pH et/ou l'accumulation excessive d'AGV.

Dans l'étude de Güngör-Demirci et Demirer (2004), le traitement anaérobie et la génération de biogaz potentielle de mélanges de litières de **volaille** et de bovins en différentes proportions ont été étudiés. Les produits testés avaient deux concentrations de **demandes chimiques en dioxygène** initiales différentes (12 000 et 53 500 mg/L). Les effets de la concentration en DCO initiale, de la supplémentation en **nutriments** et en **éléments traces métalliques**, l'acclimatation microbienne et la température de digestion ont été analysés. Plus la DCO initiale était élevée, plus les **rendements** en biogaz augmentaient (180-270 à 223-368 mL de gaz/g de DCO ajouté).

La deuxième stratégie existante pour améliorer le **rendement** en biogaz vise à capturer l'ammoniac. Elle s'effectue au moyen d'un récupérateur d'ammoniac, couplé à un **réacteur à lit de boues expansées** (UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket) (Rao *et al.*, 2008). Le lixiviat de litière était introduit en bas du réacteur et les phases gazeuses, solides et liquides étaient séparées en haut de celui-ci. La réaction était amorcée par inoculation avec la boue d'épuration et la **Charge Volumique Appliquée** (CVA) était augmentée de façon progressive de 5,4 à 22,2 kg de **Demande Chimique en Dioxygène** (DCO) par m³ et par jour, pour déterminer la CVA maximum obtenue avec un **Temps de Séjour Hydraulique** (TSH) optimal.

Le réacteur UASB avec le récupérateur comme mécanisme de contrôle de l'inhibition par l'ammoniac a montré des meilleures performances pour tous les paramètres étudiés, par rapport au réacteur UASB sans récupérateur. L'amélioration de la performance était due à la diminution de l'**ammoniac total** (NH₃ + NH₄⁺) et de l'ammoniac libre (NH₃).

La troisième stratégie consiste à inoculer la litière avec un mélange bactérien, afin d'empêcher la formation d'ammoniac. Dong et Tollner (2003) ont étudié deux approches différentes basées sur le développement d'un nouveau processus et sur la transformation biologique de l'**azote**, pour extraire l'**azote** des litières de **volaille** sous forme de N₂ gazeux (par **dénitrification**), tout en stabilisant les déchets. Le processus, connu sous le nom de AnammoxND (pour ANAerobic AMMONia OXidization, oxydation anaérobie de l'ammoniac) a été testé en cultivant des lots de bactéries anaérobies dans des bouteilles de sérum. Le procédé AnammoxND utilise les nitrites comme accepteurs d'électron lors de l'oxydation à médiation bactérienne de l'ammoniac pour obtenir du N₂. Avec l'ajout de nitrite et l'inoculation par la boue d'épuration activée retournée (*Planctomycetales*), une diminution significative de la concentration en ammonium était observée dans la **digestion anaérobie** des **fumiers** de **volaille**. Ceci permettait d'améliorer le **rendement** en méthane de la **digestion anaérobie**. Le procédé AnammoxND est donc un moyen de réduire l'ammoniac formé lors de la méthanisation, et devrait augmenter la quantité de gaz produit par la **biométhanisation**.

Enfin, plusieurs autres approches ont été testées pour améliorer les performances de digestion incluant l'optimisation de la température de la réaction, du taux initial de matière sèche, du temps de séjour et l'ajout d'adsorbants et de surfactants. Desai *et al.* (1994, dans Kelleher *et al.*, 2002) et Desai et Madamwar (1994a,b dans Kelleher *et al.*, 2002) ont testé ces différentes options et ont conclu que la production de gaz totale, incluant le méthane, lors de la digestion de la litière de **volaille** mélangée avec du fromage de lactosérum était optimale sous les conditions suivantes :

- lorsque le **temps de séjour** était maintenu à environ 10 jours, la **charge volumique** de 6,0 g MS/litre de digesteur par jour était utilisée et un taux de MS de 6 % ;
- 4 g/L d'adsorbant étaient ajoutés (dans ce cas du gel de silice). Il y avait alors un doublement de la production de gaz ;
- l'ajout de surfactants, comme le laurylsulfate de sodium, résultait en une amélioration de la digestion.

En conclusion, la **digestion anaérobie** du **fumier** de **volaille** permet de récupérer de l'énergie sous forme de gaz (méthane). Les principaux problèmes liés à l'utilisation du **fumier** sont le taux de matière sèche important et la formation d'ammoniac lors de la **biométhanisation**. Les stratégies disponibles pour augmenter le **rendement** en gaz sont les suivantes : diluer le **fumier**, utiliser des mélanges **fumier-lisier**, capturer l'ammoniac produit, utiliser la **nitrification** pour extraire l'**azote** de la litière ou encore ajouter des adsorbants ou des surfactants.

b) Gazéification

Contrairement à la **combustion**, la **gazéification** a été limitée à une petite échelle ou pour des applications en laboratoire. Une usine de **gazéification** basée aux Pays-Bas utilise le **fumier de volaille** comme ressource (Buffinga *et al.*, 2005 dans Florin *et al.*, 2009). Une chambre de **gazéification à lit fluidisé** produit de la chaleur pour l'utilisation à la ferme et de l'électricité pour le réseau électrique, alors que les cendres sont utilisées par une compagnie de construction de routes.

La co-gazéification des matériaux de **biomasse**, incluant les déchets de **volaille** dans des centrales électriques utilisant des **combustibles** fossiles fournit une opportunité pour réduire les émissions de **carbone** dans les centrales existantes.

En conclusion, les procédés de récupération des gaz peuvent fonctionner pour la litière de **volaille** ; l'ajout d'adsorbant et de surfactants permettent d'améliorer leur efficacité. Ces traitements ne sont possibles que si une flore bactérienne adéquate est présente. Enfin, les **rendements** en méthane sont très variables en fonction du procédé utilisé.

4. Pyrolyse

a) en chambre de combustion à lit fluidisé

La technologie de la **pyrolyse** est utilisée pour convertir le **fumier de volaille** en produits à valeur ajoutée comme la **bio-huile**, du gaz et des **engrais**. La **pyrolyse** rapide des copeaux de bois *versus* du **fumier de volaille** (poulets ou dindes élevés sur une litière de copeaux de bois) a été entreprise par Kim *et al.* (2009) pour récupérer de la **bio-huile**, du gaz et du produit de **carbonisation** dans une chambre de **combustion à lit fluidisé** à des températures moyennes de 450-550 °C. Le **rendement** en **bio-huile** du **fumier de volaille** était relativement faible (15-30 %) par rapport à celui obtenu à partir de copeaux de bois (34-42 %). Les **rendements** en produits gazeux augmentaient de 32 à 61 % avec l'augmentation de la température de **pyrolyse**, et le **rendement** en cendres dépendait de l'espèce de **volaille** et des conditions de réaction. Le **pouvoir calorifique supérieur** de la **bio-huile** de copeaux de bois était de 24 000 kJ/kg alors que celui de la **bio-huile** du **fumier de volaille** variait entre 26 000 et 29 000 kJ/kg. Le produit de **carbonisation** avait des fortes concentrations en potassium, calcium, **phosphore** et **azote**. On suppose que la **pyrolyse** rapide est une des technologies prometteuses pour recycler la litière de **volaille** tout en générant des produits à haute valeur ajoutée (Kim *et al.*, 2009).

b) En chambre de combustion à grille

La **dévolatilisation** est une étape importante qui se déroule lors des premiers stades de la conversion thermique des particules de **combustibles** solides. La **dévolatilisation** rapide a lieu pour des vitesses de chauffage importantes (de 10^3 à 10^5 K/s). Di Nola *et al.* (2009) ont réalisé des expériences de **dévolatilisation** rapide du charbon et de **biomasse combustible** (dont la litière de **volaille**) en utilisant un montage à grille chauffé intégré avec un spectrophotomètre (FTIR) pour une analyse gazeuse *in situ*.

La proportion de CO₂ et de CO variait en fonction de la température de **pyrolyse** (plus de CO aux températures supérieures à 800 °C). Les espèces azotées formées au cours de la **pyrolyse** étaient l'ammoniac principalement, le HCN, les oxydes d'**azote** (NO_x), et le **diazote** (N₂). Lorsque la

température était basse ($< 600\text{ }^{\circ}\text{C}$), c'est le NH_3 qui était majoritaire ; plus la température augmentait, et plus la proportion de HCN devenait importante.

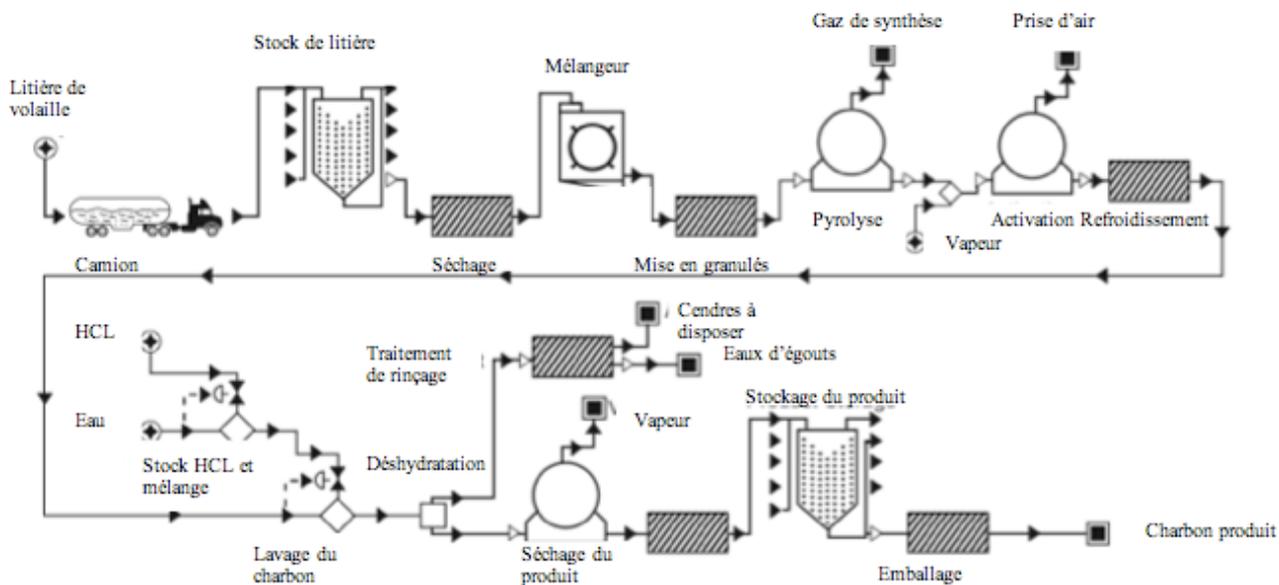
Les résultats suggèrent que, pour les applications de la **combustion**, l'efficacité du contrôle de NO_x pourrait être améliorée quand les **combustibles** de **biomasse** sont co-brûlés avec le charbon, si une **dévolatilisation** complète est assurée dans la zone de forte concentration en **combustible** du four.

c) Production de charbon activé

Le **charbon activé** ou actif est utilisé pour traiter les eaux usagées grâce à ses propriétés adsorbantes vis-à-vis des **métaux lourds**. Il existe sous forme de poudre (diamètre des particules $< 0,177\text{ mm}$) ou sous forme **granulée** (diamètre $> 0,177\text{ mm}$) et est produit par chauffage de matériaux à base cellulosique ou de **charbon bitumeux** à une température comprise entre 600 et $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ en l'absence d'air (**pyrolyse**) (Marsh et Reinoso, 2006 dans Guo *et al.*, 2009b). Les matériaux traditionnellement utilisés pour la fabrication de **charbon activé** sont la coque de noix coco ou le **charbon bitumeux**. Ces deux **substrats** présentent des inconvénients majeurs : la noix de coco est insuffisamment disponible et le charbon est une ressource non renouvelable et coûteuse. D'où la nécessité de trouver des matériaux alternatifs telle la litière pour la fabrication du **charbon activé**.

Pour produire du **charbon activé**, le **fumier** est d'abord séché jusqu'à un taux d'humidité de 25% . Il est ensuite réduit en particules de taille inférieure à 1 mm puis transformé en **granulés**. Le charbon est produit par **pyrolyse** de **granulés** de litière de **volaille** sous atmosphère inerte à $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant une heure. L'activation se produit ensuite par chauffage à $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 45 min en présence de vapeur d'eau. Le **charbon activé** est ensuite refroidi jusqu'à une température inférieure à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ puis lavé avec une solution acide (*figure 9*).

Figure 9 : schéma de procédé de la fabrication de charbon activé. D'après Lima *et al.*, 2008.



Cette opération a été réalisée avec un **rendement** final de $31,3\%$ par Qiu et Guo (2010). Un charbon actif de bonne qualité a une capacité d'adsorption élevée, laquelle s'évalue de la façon suivante : le diamètre moyen et le coefficient d'uniformité des particules sont faibles, la **densité apparente** est faible, et la **dureté** de surface est élevée. La surface d'**adsorption** est estimée grâce à

la **surface spécifique** (qui est importante si le charbon actif est de bonne qualité) et par la quantité de micropores (5-30 μm), ultramicropores (0,1-5 μm) et cryptopores ($< 0,1 \mu\text{m}$). Pour le **fumier de volaille**, les propriétés physiques et chimiques du produit final étaient comparables à celle des charbons actifs bas de gamme du commerce (à base de cosse de noix de coco ou de **charbon bitumeux**) avec un diamètre moyen des particules de 2,59 mm, un coefficient d'uniformité des particules de 2,25, une **densité apparente** de 0,45 g/cm^3 , et une **dureté** de surface de 91,0. La **surface spécifique** BET était de 403 m^2/g . L'examen en microscopie électronique à balayage a montré qu'il contenait de nombreux micropores, ultramicropores et cryptopores. Le **charbon activé** à base de litière de **volaille** présentait des taux importants de cendres, d'**azote**, de **phosphore** et des oligoéléments Cu, Zn et As. Cependant, la majorité de ces **nutriments** et des éléments toxiques n'étaient pas extraits en solution. L'utilisation du **charbon activé** fabriqué à partir de litière de **volaille** pour le traitement des eaux usagées dans le but extraire les ions métalliques ne poserait donc pas de risques de contamination secondaire.

Intéressons-nous à présent aux capacités d'**adsorption** des charbons actifs produits à partir de litière de **volaille**. Elles permettront de déterminer les conditions de production pour lesquelles la qualité du produit final est optimale. Lima et Marshall (2005a) ont étudié la conversion des échantillons de **granulés** de litière de dinde et de **gâteau** de dinde en **charbon activé** sous forme **granulée** par activation à la vapeur. Les propriétés physiques, chimiques et adsorbantes dépendaient toutes des conditions d'activation (débit de vapeur d'eau et temps d'activation). La surface d'**adsorption** obtenue, susceptible notamment de capter les molécules organiques apolaires, variait de 248 à 472 m^2/g . Lorsque la quantité d'activateur et le temps d'activation augmentaient, le **rendement** en charbon diminuait (variant entre 37 % et 23 %) contrairement à l'**adsorption** de l'ion cuivre qui s'accroissait de 0,72 à 1,86 $\text{mmol Cu}^{2+}/\text{g}$ de charbon. La plus forte **adsorption** de l'ion cuivre a été atteinte pour le charbon actif issu de litière de dinde activé à 3 mL/min pendant 60 min, surpassant tous les échantillons industriels utilisés en comparaison. Avec une sélection attentive de la quantité d'activateurs et du temps d'activation, il est donc possible d'optimiser les performances du charbon obtenu en termes de **rendement**, de surface microporeuse générée et d'**adsorption** ionique.

Dans une seconde étude, Lima et Marshall (2005b) ont produit des charbons activés **granulés** à partir de litière et de **gâteau** de poulet de chair en **granulés** en utilisant l'activation à la vapeur, et ils ont étudié les effets du débit de vapeur d'eau et du temps d'activation sur les propriétés physiques, chimiques et adsorbantes des charbons produits. Les résultats indiquent que la litière ou le **gâteau** de poulet en granulats peuvent produire des charbons activés **granulés** avec des capacités d'**adsorption** de l'ion cuivre excellentes. Les **rendements**, surface d'**adsorption** et coefficient d'**adsorption** de l'ion cuivre variaient respectivement de 18 à 28 %, 253 à 548 m^2/g , et 0,13 à 1,92 $\text{mmol Cu}^{2+}/\text{g}$ de charbon actif. Ceux fabriqués à partir du **gâteau** de litière de poulet étaient plus efficaces pour adsorber l'ion cuivre de l'eau que les charbons du commerce testés. Le **gâteau** de poulet de chair contient plus de **phosphore** que la litière, qui jouerait selon les auteurs un rôle important dans l'**adsorption** du cuivre.

Pour les autres ions métalliques en solution, Guo *et al.* (2009b) ont montré que le **charbon activé** dérivé de la litière de **volaille** avait des capacités d'**adsorption** et des affinités pour les **métaux lourds** significativement plus grandes que les charbons activés industriels dérivés du **charbon bitumeux** et de la coque de noix de coco. La libération de **nutriments** et d'ions métalliques à partir de **charbon activé** dérivé de la litière de **volaille** ne posait pas de risque de pollution secondaire de l'eau.

Enfin, Lima *et al.* (2008) ont étudié la rentabilité potentielle de l'installation d'une usine de production de **charbon activé** à partir de litière de **volaille**. Leur objectif était de développer une estimation du coût opérationnel en utilisant un programme de simulation SuperPro DesignerND. Les auteurs ont considéré que l'usine de fabrication de **charbon activé** pouvait obtenir la litière chez divers exploitants avicoles au coût de 5,50 \$/t et la transporter pour 27,50 \$/t. L'usine pouvait traiter 20 tonnes de litière par jour et la convertissait en **granulés de charbon activé** pour un **rendement** final de 21,6 % par rapport à la matière sèche initiale. Cette usine opérait en continu, 330 j/an. Divers paramètres ont été incorporés dans l'étude incluant la taille de l'équipement, les coûts d'immobilisation du capital et les charges, comme le travail, la maintenance et la dépréciation des équipements. Le plus important contributeur au coût de production du **charbon activé** était les 1 200 000 \$ consacrés à l'équipement de la fournaise combinée **pyrolyse/activation**, représentant 0,47 \$/kg du produit final. Le coût de fabrication pour un kilogramme de **charbon activé** dépendait de la taille de l'usine de fabrication. En dépit de la nécessité d'un investissement initial plus important, des installations plus importantes permettaient de réaliser des économies d'échelle conséquentes. En fonction des lois locales des différents états (cette étude a lieu aux Etats-Unis d'Amérique), des subventions environnementales contribuaient à réduire le coût de production pour l'entrepreneur. De plus, si certaines modifications étaient incorporées au système, comme la récupération des gaz synthétisés et leur recyclage comme source d'énergie, des économies supplémentaires pourraient être réalisées. Cette étude indique que le **charbon activé** pourrait être produit par cette méthode à un coût d'environ 1,44 \$ /kg.

Grâce à leur capacité d'**adsorption** des métaux, les charbons activés à base de litière de **volaille** peuvent se positionner sur les marchés de la dépollution de l'eau.

La plupart des usines de fabrication de **charbon activé** utilisent le charbon comme précurseur. Cependant, c'est un matériau non-renouvelable et très cher par rapport à la litière disponible dans les élevages avicoles. De plus, l'intérêt d'une usine de fabrication de charbon à base de la litière de **volaille** pourrait être considérable pour les éleveurs de poulets de chair, en termes de débouché durable pour le recyclage de ce déchet à teneur élevée en **azote** et en **phosphore**. Ceci représente une solution potentielle pour traiter un déchet matériel problématique qui plus est avec une forte valeur ajoutée.

En conclusion, la litière de **volaille** pourrait être utilisée comme matériel précurseur pour la fabrication industrielle de **charbon activé** en **granulés** qui serait utilisé dans le traitement des eaux usagées pour extraire les **métaux lourds** (notamment le cuivre, avec du **charbon activé** produit à partir de litière de dinde). De plus, l'installation d'une usine de fabrication de **charbon activé** à partir de litière de **volaille** permettrait de le produire à un coût compétitif (par rapport au **charbon bitumeux** notamment). Cette production valoriserait donc la litière de **volaille** tout en respectant l'environnement et constitue une piste à forte valeur ajoutée de recyclage des déchets organiques.

De nombreuses alternatives sont donc possibles pour le recyclage de la litière de **volaille**. Elles s'inscrivent toutes dans une démarche d'impact minimal sur l'environnement : la **combustion** fournit de l'énergie sous forme de chaleur et d'électricité, en réduisant les émissions gazeuses ; la **digestion anaérobie** et la **gazéification** recycle le méthane de la litière ; le charbon actif adsorbe les **éléments traces métalliques** dans les eaux usées ; la **pyrolyse** permet l'obtention de **bio-huile**.

C. La litière, milieu de culture pour les bactéries

La production de milieux de culture bon marché et prêts à l'emploi pour les bactéries fait l'objet de nombreuses recherches. Puisque la litière contient environ 30 % de glucides et 30 % de protéines brutes, elle constitue une ressource biologique potentielle pour la fabrication de tels milieux. *Bacillus thuringiensis* est très utilisé pour la production de bioinsecticides aux Etats-Unis d'Amérique. Un bouillon pour la culture de *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* a été préparé par extraction de 100 g de litière de **volaille** dans 1,0 L d'eau (Adams *et al.*, 1999). Une croissance filamenteuse se développait pendant les 6 premières heures de **fermentation** dans l'extrait pur et dans l'extrait au 1/2. Cette dilution avait une concentration en **carbone** organique totale de 1,7 g/L et produisait le nombre de spores le plus important soit $2,46 \times 10^8$ spores/mL. L'analyse SDS-PAGE des protéines cristallisées des spores produites pendant la **fermentation** indiquaient un poids moléculaire d'approximativement 135 000 Da, suggérant la présence d'une protoxine insecticide bactérienne. Aucune vitamine, facteur de croissance, minéral ou **nutriment** n'était ajouté à l'extrait de litière de **volaille** utilisé pour la production de spores de *B. thuringiensis* subsp. *kurstaki*. Avec un prétraitement approprié, la litière de poulet de chair pourrait donc constituer un milieu de culture inégalement intéressant pour la croissance, la sporulation et la production de protoxines. Cependant, les pratiques d'élevage, notamment l'emploi d'antibiotiques dans la ration des oiseaux pourraient interférer avec la croissance bactérienne. Différentes variétés de **fumiers** de poulet de chair stérilisés par la chaleur et ajustés à 60 % de taux d'humidité ont été évalués en tant que **substrat** solide de **fermentation** pour produire des agents de **biocontrôle**. Les variétés de **fumiers** incluaient la litière produite par une bande de poulets de chair recevant une ration médicamenteuse (Bacitracine 125 mg/kg et Monensin 99 mg/kg) ou non. Pour la première catégorie de **fumier**, l'influence d'autres paramètres étaient testée comme le nombre de bandes élevées sur la litière avant **curage** et l'apport de litière propre entre les bandes. Après broyage et tamisage, une partie des prélèvements a subi une extraction par l'eau ou le méthanol. Les solutions ainsi obtenues et des échantillons de litière ont ensuite été inoculés avec des monocultures de *Bacillus thuringiensis* serovar *japonensis* souche Buibui, un agent pathogène de la larve de coléoptère japonais (*Popillia japonica*), ou *Pseudomonas fluorescens* 2-79 (agent de **biocontrôle** des maladies des racines causées par des champignons) et mises à fermenter dans des sacs à 30 °C (Adams *et al.*, 2002). *B. thuringiensis* ne poussait pas sur la litière lorsqu'une seule bande d'animaux y avaient été élevée, ni dans l'extrait aqueux de cette même litière, mais poussait en méthanol extrait (même litière d'origine) jusqu'à 5×10^{10} unités formant colonie (UFC)/g MS de litière et un comptage de spores de 1×10^{10} UFC/g MS de litière. *B. thuringiensis* poussait également sur les préparations de litière de 2 et de 4 bandes d'animaux, atteignant des comptages cellulaires de 3×10^9 et 1×10^9 UFC/g MS de litière, respectivement, et des comptages de spores de 1×10^9 UFC/g MS de litière. *P. fluorescens* poussait sur la litière correspondant à une bande ayant reçu une ration médicamenteuse jusqu'à une **densité** cellulaire supérieure à 4×10^{11} UFC/g MS de litière. Des bio-essais dans un sol contenant plus de 0,5 % de litière fermentée avec *B. thuringiensis* résultaient en plus de 90 % de mortalité en 21 jours pour les premiers stades larvaires du coléoptère japonais, lorsqu'on comparait à un traitement de contrôle utilisant un **compost** sans litière fermentée. Les investigations démontrent que les agents de **biocontrôle** bactériens produits par des **fermentations** de **substrat** solide, utilisant la litière de poulet de chair, pourraient être efficaces dans l'environnement du sol.

La litière de **volaille** peut donc être utilisée avec succès dans la mise au point de milieux de culture pour *B. thuringiensis* et *P. fluorescens*, agents de **biocontrôle** de coléoptère nuisibles pour la culture des végétaux ou de moisissures responsables de maladies des racines.

CONCLUSION

La litière est en premier lieu utilisée pour assurer le confort et l'isolation des oiseaux élevés et absorber l'humidité. Elle constitue un **écosystème** complexe et dynamique qui évolue au fil de l'élevage des animaux. Il permet notamment la prolifération de nombreuses bactéries (y compris pathogènes) et participe au cycle de plusieurs parasites ou nuisibles. De nombreuses pratiques d'élevage peuvent interférer avec l'évolution de la litière, lesquelles conduiront à une amélioration ou une dégradation de son état, responsable de problèmes de santé chez les oiseaux et le personnel de l'élevage, ainsi que de pertes économiques parfois importantes. L'évolution ultime de la litière aboutit au **fumier**, résidu obtenu après le départ des **volailles**.

Le **fumier** est ensuite évacué hors du bâtiment, puis éventuellement stocké ou composté. Il peut également être transformé en **granulés**. Ces différentes transformations aboutissent à un assainissement partiel ou total du **fumier**.

Le **fumier** est produit à travers le monde en quantités très importantes et son recyclage, lorsqu'il est mal maîtrisé, peut être à l'origine d'une pollution importante de l'eau et de l'air.

Depuis toujours, le **fumier** a été traditionnellement épandu sur les pâtures. Cette pratique s'est progressivement généralisée aux cultures en rang (maïs, coton) mais également sur les cultures maraîchères. Ce type d'**amendement** a pu conduire à une pollution importante de l'eau par **lessivage** et **ruissellement** des **nutriments** en excès (**azote, phosphore, éléments traces métalliques**).

La litière peut, dans certains pays (Etats-Unis d'Amérique notamment), être incorporée à la ration du bétail, le plus souvent sous forme de suppléments d'urée à consommation lente. Cette incorporation à l'aliment du bétail est très controversée, car la litière contient de nombreux agents pathogènes qui ne sont pas toujours éliminés avant d'être proposé au bétail.

Pendant l'élevage, le stockage ou le **compostage** et l'**épandage**, des émissions de gaz nocifs à forts impact polluant peuvent survenir (ammoniac, méthane). Différentes pratiques visant à réduire ces émissions ont été développées comme l'inoculation bactérienne de la litière pendant l'élevage, les **amendements** de **zéolithe** sur le **compost** ou encore l'**enfouissement** de la litière lors de son **épandage**.

Des méthodes alternatives ont donc été développées pour limiter la pollution causée par la litière de **volaille**. Elle peut être utilisée pour la production d'énergie thermique, électrique ou gazeuse. Elle est également recyclée pour fabriquer du charbon actif qui pourra servir à adsorber les **métaux lourds** et retraiter des eaux contaminées.

Enfin, une nouvelle approche pour évaluer l'impact des élevages sur l'environnement, connue sous le nom d'analyse du cycle de vie, consiste à identifier les causes les plus importantes des émissions (par ex. nitrates, ammoniac, **phosphore, métaux lourds**, etc.) afin de pouvoir prendre des mesures destinées à les diminuer (Baumgartner *et al.*, 2007). Cette méthode évalue et quantifie les impacts sur l'environnement d'un produit ou d'une opération. Elle permet de prendre en compte tous les effets connus qu'un système de production peut avoir sur l'environnement, de l'obtention des matières premières à l'élimination ou au recyclage des déchets ultimes (« du berceau à la tombe »). On vise autant que possible à appréhender la totalité des impacts sur l'environnement afin que d'éventuels transferts d'impacts environnementaux entre les différentes étapes de production soient détectés. L'application d'une telle méthode a permis, par exemple de montrer que la substitution du

soja brésilien par des protéagineux d'origine européenne dans l'aliment des **volailles** avait un effet environnemental favorable au niveau de la gestion des ressources. En particulier, la limitation des transports, ainsi que la réduction des céréales (dont le maïs en particulier) dans les formules d'aliments diminuaient les besoins en énergie. Donc une mesure efficace consiste en l'occurrence à privilégier les ingrédients indigènes pour diminuer les flux de matières. Par contre, pour la gestion des éléments fertilisants et des polluants, l'incorporation des protéagineux serait plutôt défavorable car elle s'accompagne d'une incorporation accrue d'autres sources de protéines (tourteau de tournesols et de colza). Une telle méthode permet donc d'envisager l'élevage dans sa globalité et de limiter en conséquence son empreinte écologique. Comme pour l'influence des matières premières, cette approche pourrait être utilisée pour déterminer l'impact des pratiques de recyclage de la litière.

BIBLIOGRAPHIE

- ABELHA P, GULYURTLU I, BOAVIDA D, BARROS JS, CABRITA I, LEAHY J, KELLEHER B, LEAHY M, HENIHAN AM. (2003) Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor. *Fuel*, **82**(6), 687-692.
- ADAMS TT, EITEMAN MA, ADANG MJ. (1999) *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* spore production in batch culture using broiler extracts as complex media. *Bioresource Technology*, **67**, 83-87.
- ADAMS TT, EITEMAN MA, HANEL BM. (2002) Solid state fermentation of broiler litter for production of biocontrol agents. *Bioresource Technology*, **82**(1), 33-41.
- AHERN KS, AHERN CR, UDY JW. (2008) In situ field experiment shows *Lyngbya majuscula* (cyanobacterium) growth stimulated by added iron, phosphorus and nitrogen. *Harmful Algae*, **7**(4), 389-404.
- ALLAIN E, AUBERT C. (Mars 2009) Réorganiser l'azote dès le bâtiment par un complexe de microorganismes pour réduire fortement les pertes d'ammoniac en bâtiment et au champ, et les pertes par lessivage de nitrates au champ, en obtenant sans retournement un compost normé, au bénéfice des animaux, de l'économie et de l'environnement. In : *Huitièmes Journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], St Malo (Fr) : SOBAC. [http://www.bacteriosol-sobac.com/admin/medias/actualites/200907091452120712-article_jra2009_d_finitif.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).
- ALLEN SC, NAIR VD, GRAETZ DA, JOSE S, NAIR PKR. (2006) Phosphorus loss from organic versus inorganic fertilizers used in alleycropping on a Florida Ultisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **117**(4), 290-298.
- ALPHA UT. (2009) Alpha-Biopaq : Procédé UASB. In : *Prétraitement anaérobie d'eau usée chargée de composants organiques*. [en-ligne], Nidau (Suisse) : Alpha UmweltTechnik. [<http://www.alphaut.ch/lib/alpha/23498fv155e3mhNlmF7WXd1N.pdf>] (consulté le 04 Janvier 2010).
- ANDREWS SS, LOHR L, CABRERA ML. (1999) A bioeconomic decision model comparing composted and fresh litter for winter squash. *Agricultural Systems*, **61**(3), 165-178.
- ANGUS AJ, HODGE ID, MCNALLY S, SUTTON MA. (2003) The setting of standards for agricultural nitrogen emissions: a case study of the Delphi technique. *Journal of Environmental Management*, **69**(4), 323-337.
- AUBERT C, GADAIS C. (Mars 2005) Caractérisation des fumiers issus de dindes à la sortie des bâtiments et estimation des rejets en azote et en phosphore. In : *Sixièmes Journées de la Recherche Avicole*. 112-116. [en-ligne], St Malo (Fr) : ITAVI. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/6_JRA/Environnement/B108-AUBERT-CD.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).
- AZOTE.INFO. (2008) Le cycle de l'azote. In : *Information et communication sur l'azote – L'azote dans le sol et dans la plante*. [en-ligne], Mise à jour le 15 Octobre 2008. [http://www.azote.info/files/cycle_azote.html] (consulté le 10 Janvier 2010).
- BAIZE D. (2006) Définition et Généralités. In : *Les Éléments Traces Métalliques dans les sols. Tout ce qu'il faut savoir !* [en-ligne], Université de Poitiers (Fr) : INRA. [<http://www.denis-baize.fr/documents/POITIERS-Chap.1-Generalites.pdf>] (consulté le 29 Décembre 2009).
- BARIL D. (2008) Le biocontrôle permet d'éviter le recours aux pesticides. In : *UdeMNouvelles*. [en-ligne], Montréal (Canada) : Université de Montréal. [<http://www.nouvelles.umontreal.ca/recherche/sciences-technologies/le-biocontrôle-permet-d-eviter-le-recours-aux-pesticides-2.html>] (consulté le 10 Janvier 2010).

BASTIANELLI D, LESCOAT P, BOUVAREL I, HERVOUET C. (Mars 2007) Analyse des composés azotés des fumiers de volaille de chair par spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR). Application à l'étude de la variabilité intra- et inter-élevage. In : *Septièmes Journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], Tours (Fr) : CIRAD, INRA, ITAVI. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/7_JRA/Environnement/EN32-BASTIANELLI.version-def.pdf] (consulté le 02 janvier 2010).

BAUMGARTNER DU, CREPON K, NEMECEK T. (Mars 2007) Analyse du cycle de vie de la production d'aliments pour poulets de chair et poules pondeuses : influence du choix des matières premières. In : *Septièmes Journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], Tours (Fr). [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/7_JRA/Environnement/ENS-BAUMGARTNER-version%20def.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).

BEDNAR AJ, GARBARINO JR, FERRER I, RUTHERFORD DW, WERSHAW RL, RANVILLE JF, WILDEMAN TR. (2003) Photodegradation of roxarsone in poultry litter leachates. *The Science of The Total Environment*, **302**(1-3), 237-245.

BERNARD A, BERNARD JY, DEPOND C, GARCIA I, SANT M. (Mise à jour le 15 Janvier 2010) Composé organique volatil. *Composé organique volatil – encyclopédie scientifique en ligne*. [en-ligne], Evry (Fr) : Techno-science.net. [<http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=1080>] (consulté le 14 Janvier 2010).

BERNHART M, FASINA OO. (2009) Moisture effect on the storage, handling and flow properties of poultry litter. *Waste Management*, **29**(4), 1392-1398.

BERNHART M, FASINA OO, FULTON J, WOOD CW. (2010) Compaction of poultry litter. *Bioresource Technology*, **101**(1), 234-238.

BRODEUR C, CLOUTIER J, CROWLEY D, DESMEULES X, PIGEON S, ST-ARNAUD RM. (2008) La production de biocombustibles solides à partir de biomasse résiduelle ou de cultures énergétiques. *Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec*. [en-ligne], Québec (Canada) : CRAAQ, Publication EVC 032 [<http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC032.pdf>] (consulté le 02 janvier 2010).

BROSH A, HENKIN Z, ORLOV A, AHARONI Y. (2006) Diet composition and energy balance of cows grazing on Mediterranean woodland. *Livestock Science*, **102**(1-2), 11-22.

BROWN BL, SLAUGHTER AD, SCHREIBER ME. (2005) Controls on roxarsone transport in agricultural watersheds. *Applied Geochemistry*, **20**(1), 123-133.

BUJOCZEK G, OLESZKIEWICZ J, SPARLING R, CENKOWSKI S. (2000) High solid anaerobic digestion of chicken manure. *J. agric. Engng Res.*, **76**, 51-60.

BUNTING LD, YAVUZ M, FERNANDEZ JM, SOLAIMAN SG. (2002) Growth and metabolic responses of Holstein calves fed broiler litter-based diets supplemented with L-carnitine. *Animal Feed Science and Technology*, **98**(1-2), 61-71.

BUSH DJ, POORE MH, ROGERS GM, ALTIER C. (2007) Effect of stacking method on *Salmonella* elimination from recycled poultry bedding. *Bioresource Technology*, **98**(3), 571-578.

CALANDRE P, JANOCO D. (2006) Glossaire et index. In : *Protection et gestion des rivières du secteur Seine-aval*. [en-ligne], Nanterre (Fr) : Agence de l'eau Seine-Normandie. [http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/seine-aval/Documents_Formations/Guide_rivieres/Glossaire_et_index.pdf] (consulté le 04 Décembre 2010).

CARRE B, GOMEZ J, MELCION JP, GIBOULOT B. (1994) La viscosité des aliments destinés à l'aviiculture. Utilisation pour prédire la consommation et l'excrétion d'eau. *INRA Production Animales*, **7**(5), 369-379.

CARTER TA, POORE M. (1995 mise à jour Juin 1996) Deep stacking broiler litter as a feed for beef cattle. *In: Southern Regional Beef Management Handbook*. [en-ligne], Raleigh (Caroline du Nord, Etats-Unis d'Amérique) : North Carolina Extension Service, Publication AG 515-2. [<http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/evans/ag515-2.html>] (consulté le 01 Décembre 2009).

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC. (2007) Détermination du phosphore total dissous et du phosphore total en suspension dans les eaux : dosage par méthode colorimétrique automatisée avec du molybdate d'ammonium, MA. 303 – P 3.0, Rév. 1, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 15 p.

CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC et MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC. (2003) Détermination des métaux extractibles dans les sols agricoles : méthode par spectrométrie d'émission au plasma d'argon ou par spectrométrie d'absorption atomique après extraction avec la méthode Mehlich III, MA. 1010 – Mét. ass. 1.0, Ministère de l'Environnement du Québec, 12 p.

CHEVALIER D, AUBERT C, LEVEQUE M, GADAIS C. (Mars 2005) Caractérisation des fumiers issus de poulets label et estimation des rejets en azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc. *In : Sixièmes Journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], St Malo (Fr) : Chambre d'Agriculture des Pays de Loire. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/6_JRA/Environnement/B98-CHEVALIER-CD.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).

CONSEIL CANADIEN DU COMPOSTAGE. (2009) Compostage de la matière organique. Description des Procédés Existants. [en-ligne] Toronto (Canada): Conseil Canadien du Compostage. [http://www.compost.org/pdf/compost_proc_tech_fr.pdf] (consulté le 10 Janvier 2010).

DA BORSO F, CHIUMENTI R. (1999) Poultry housing and manure management systems : recent developments in Italy as regards ammonia emissions. *In: Proceedings of the 8th International Conference of the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture, RAMIRAN 98*. Rennes (Fr) : 26-29 Mai 1998. Emeryville (Californie, Etats-Unis d'Amérique) : Alibris, **2**, 15-21.

DANIELO O. (2005) Un carburant à base d'huile d'algue. *Biofutur*, **255**, 33-36.

DAO TH, ZHANG H. (2007) Rapid composition and source screening of heterogeneous poultry litter by X-ray fluorescence spectrometry. *Annals of Environmental Science*, **1**, 69-79.

DAO TH, HOANG KQ. (2008) Dephosphorylation and quantification of organic phosphorus in poultry litter by purified phytic-acid high affinity *Aspergillus* phosphohydrolases. *Chemosphere*, **72**(11), 1782-1787.

DI NOLA G, JONG W, SPLIETHOFF H. (2009) The fate of main gaseous and nitrogen species during fast heating rate devolatilization of coal and secondary fuels using a heated wire mesh reactor. *Fuel Processing Technology*, **90**(3), 388-395.

DONG X, TOLLNER EW. (2003) Evaluation of Anammox and denitrification during anaerobic digestion of poultry manure. *Bioresource technology*, **86**, 139-145.

DRIRE HN. (2003) *La demande chimique en oxygène*. [en-ligne], Mise à jour Décembre 2008. [<http://www.drire.gouv.fr/haute-normandie/environnement/Bilan/CHAPITRE%2021.html>] (consulté le 04 Janvier 2010).

ELDRIDGE SM, CHAN KY, BARCHIA I, PENGELLY PK, KATUPITIYA S, DAVIS JM. (2009) A comparison of surface applied granulated biosolids and poultry litter in terms of risk to runoff water quality on turf farms in Western Sydney, Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **134**(3-4), 243-250.

- ELWINGER K, SVENSSON L. (1996) Effect of dietary protein content, litter and drinker type on ammonia emission from broiler houses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **64**, 197-208.
- ENDALE DM, CABRERA ML, STEINER JL, RADCLIFFE DE, VENCILL WK, SCHOMBERG HH, LOHR L. (2002) Impact of conservation tillage and nutrient management on soil water and yield of cotton fertilized with poultry litter or ammonium nitrate in the Georgia Piedmont. *Soil and Tillage Research*, **66**(1), 55-68.
- EVANYLO G, SHERONY C, SPARGO J, STARNER D, BROSIUS M, HAERING K. (2008) Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **127**(1-2), 50-58.
- FARIDULLAH, IRSHAD M, YAMAMOTO S, HONNA T, ENEJI AE. (2009) Characterization of trace elements in chicken and duck litter ash. *Waste Management*, **29**(1), 265-271.
- FARMING FUTURES. (2010) Carbon cycle of a farm. In : *Farming Futures – Carbon cycle of a farm*. [en-ligne] [<http://www.farmingfutures.org.uk/x510.xml>] (consulté le 10 Janvier 2010).
- FERGUSON JJ, ZIEGLER MR. (Avril 2004) Guidelines for purchase and application of poultry manure for organic crop production. *Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences*. [en-ligne], Gainesville (Floride, Etats-Unis d'Amérique) : University of Florida, publication HS973. [<http://edis.ifas.ufl.edu>] (consulté le 01 Décembre 2009).
- FERNANDEZ D, COPPENS C. (1998) Les différentes formes du phosphore. *Interaction du Tarn et de la Garonne avec la retenue de Malause*. [en-ligne], Mise à jour 1998. [<http://hmf.enseiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/bei/nome33/n33a15.htm>] (consulté le 04 Janvier 2010).
- FLORIN NH, MADDOCKS AR, WOOD S, HARRIS AT. (2009) High-temperature thermal destruction of poultry derived wastes for energy recovery in Australia. *Waste Management*, **29**(4), 1399-1408.
- FRANZLUEBBERS AJ, SCHOMBERG HH, ENDALE DM. (2007) Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil and Tillage Research*, **96**(1-2), 303-315.
- FRIELD A, PADOUVAS E, ROTTER H, VARMUZA K. (2005) Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, **544**(1-2), 191-198.
- FUTURLA V, FARELL EG, DIARRASSOUBA F, REMPEL H, PRITCHARD J, DIARRA MS. (2010) Veterinary pharmaceutical and antibiotic resistance of *Escherichia coli* isolates in poultry litter from commercial farms and controlled feeding trials. *Poultry Science*, **89**, 180-188.
- GAC A, BELINE F, BIOTEAU T. (2007) Inventaire national des émissions gazeuses (CH₄, N₂O, NH₃) liées à la gestion des déjections animales : les données bibliographiques et les résultats pour l'élevage avicole. In : *Septième journées de la recherche avicole*. [en-ligne], Tours (Fr) : Cemagref. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/7_JRA/Environnement/EN116_GAC-version-def.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).
- GAYRARD V. (2009). *La thermorégulation*. École Nationale Vétérinaire de Toulouse, Unité pédagogique de Physiologie et Thérapeutique. 35p.
- GARET J, DUMAIL L, ROCABOY G, CLEMENT F, GIE EURO NUTRITION. (Mars 2003) Effet de différents niveaux d'incorporation de cuivre et de zinc sur les performances zootechniques des poulets de chair et sur leurs déjections. In : *Cinquièmes Journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], Tours (Fr) : TECHNIA, CCPA, EURO NUTRITION. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/5_JRA/environnement/89-garet.pdf] (consulté le 02 janvier 2010).

- GATES RS, CASEY KD, WHEELER EF, XIN H, PESCATORE AJ. (2008) U.S. broiler housing ammonia emissions inventory. *Atmospheric Environment*, **42**(4), 3342-3350.
- GEORGAKAKIS D, KRINTAS T. (2000) Optimal use of the Hosoya system in composting poultry manure. *Bioresource Technology*, **72**, 227-233.
- GIEC. (2001) Glossaire : Annexe B. In : *Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse*. [en-ligne] Suisse : IPCC. [<http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-fr.pdf>] (consulté le 06 Janvier 2010).
- GLANCEY JL, SIMS JT, SNYDER D. (2008) Field evaluation of a mechanical topdresser for solid wastes. *Biosystems Engineering*, **99**(3), 432-443.
- GONZALEZ-MARTIN I, HERNANDEZ-HIERRO JM. (2008) Detection and quantification of additives (urea, biuret and poultry litter) in alfalfas by nir spectroscopy with fibre-optic probe. *Talanta*, **76**(5), 1130-1135.
- GONZALEZ-MATUTE R, RINKER DL. (2006) Compatibility of ammonia suppressants used in poultry litter with mushroom compost preparation and production. *Bioresource Technology*, **97**(14), 1679-1686.
- GOTTDENKER NL, WALSH T, VARGAS H, MERKEL J, JIMENEZ GU, MILLER RE, DAILEY M, PARKER PG. (2005) Assessing the risks of introduced chickens and their pathogens to native birds in the Galápagos Archipelago. *Biological Conservation*, **126**(3), 429-439.
- GRAHAM JP, EVANS SL, PRICE LB, SILBERGELD EK. (2009a) Fate of antimicrobial-resistant *enterococci* and *staphylococci* and resistance determinants in stored poultry litter. *Environmental Research*, **109**(6), 682-689.
- GRAHAM JP, PRICE LB, EVANS SL, GRACZYK TK, SILBERGELD EK. (2009b) Antibiotic resistant *enterococci* and *staphylococci* isolated from flies collected near confined poultry feeding operations. *Science of The Total Environment*, **407**(8), 2701-2710.
- GRIFFITHS N. (2007) Best practice guidelines for using poultry litter on pastures. *Primefacts*, **534**, 1-6.
- GROUPEMENT FRANCAIS DE LA COMBUSTION. (2004) Les mots de la combustion. Université d'Orléans. [en-ligne], Orléans (Fr) : Université d'Orléans. [<http://univ-orleans.fr/lme/gfc/>] (consulté le 15 Octobre 2009).
- GUEMENE D, FAURE JM. (2004) Productions avicoles, bien-être et législation européenne. *INRA Production Animales*, **17**, 59-68.
- GUERRA-RODRIGUEZ E, VAZQUEZ M, DIAZ-RAVINA M. (2000) Co-composting of barley wastes and solid poultry manure. *Bioresource Technology*, **75**, 223-225.
- GUERRA-RODRIGUEZ E, DIAZ-RAVINA M, VAZQUEZ M. (2001) Co-composting of chestnut burr and leaf litter with solid poultry manure. *Bioresource Technology*, **78**(1), 107-109.
- GUINEBERT E, PENAUD J. (Mars 2005) Intérêt d'un traitement biologique des litières de volailles par apport d'un additif microbien en présence des animaux. In : *Sixièmes journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], St Malo (Fr) : NRG France, GBP Environnement. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/6_JRA/Environnement/B74-GUINEBERT-CD.pdf] (consulté le 14 Janvier 2010).
- GUNGOR-DEMIRCI G, DEMIRER GN. (2004) Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. *Bioresource technology*, **93**, 109-117.
- GUO M, LABREVEUX M, SONG W. (2009a) Nutrient release from bisulfate-amended phytase-diet poultry litter under simulated weathering conditions. *Waste Management*, **29**(7), 2151-2159.

- GUO M, QIU G, SONG W. (2009b) Poultry litter-based activated carbon for removing heavy metal ions in water. *Waste Management*, **30**(2), 308-315.
- GUPTA G, CHARLES S. (1999) Research notes – Trace elements in soils fertilized with poultry litter. *Poultry science*, **78**, 1695-1698.
- GUPTA G, BHASKARAN H. (2004) Use of poultry litter for biodegradation of soil contaminated with 2,4- and 2,6-dinitrotoluene. *Journal of Hazardous Materials*, **116**(1-2), 167-171.
- GUPTA G, GARDNER W. (2005) Use of clay mineral (montmorillonite) for reducing poultry litter leachate toxicity (EC50). *Journal of Hazardous Materials*, **118**(1-3), 81-83.
- GUPTA G, BHASKARAN H, KANANEN G, OKOH J. (2004) Biodegradation of 2,4-dinitrotoluene using poultry litter leachate. *Journal of Hazardous Materials*, **113**(1-3), 137-140.
- HAGGARD BE, MOORE PA Jr, CHAUBEY I, STANLEY EH. (2003) Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Export from an Ozark Plateau Catchment in the United States. *Biosystems Engineering*, **86**(1), 75-85.
- HAGGARD BE, VADAS PA, SMITH DR, DELAUNE PB, MOORE PA Jr. (2005) Effect of Poultry Litter to Water Ratios on Extractable Phosphorus Content and its Relation to Runoff Phosphorus Concentrations. *Biosystems Engineering*, **92**(3), 409-417.
- HAMMAC II WA, WOOD CW, WOOD BH, FASINA OO, FENG Y, SHAW JN. (2007) Determination of bioavailable nitrogen and phosphorus from pelletizer broiler litter. *Scientific Research and Essay*, **2**(4), 89-94.
- HASHIMOTO Y, MATSUFURU H, SATO T. (2008) Attenuation of lead leachability in shooting range soils using poultry waste amendments in combination with indigenous plant species. *Chemosphere*, **73**, 643-649.
- HASHIMOTO Y, TAKAOKA M, OSHITA K, TANIDA H. (2009a) Incomplete transformations of Pb to pyromorphite by phosphate-induced immobilization investigated by X-ray absorption fine structure (XAFS) spectroscopy. *Chemosphere*, **76**(5), 616-622.
- HASHIMOTO Y, TAKI T, SATO T. (2009b) Sorption of dissolved lead from shooting range soils using hydroxyapatite amendments synthesized from industrial byproducts as affected by varying pH conditions. *Journal of Environmental Management*, **90**(5), 1782-1789.
- HASSOUNA M, ROBIN P, BENSII Y, LECOMTE M. (Mars 2007) Contribution à la mise au point d'une méthode simplifiée de mesure des émissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote d'élevages de dindons. In : *Septième Journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], Tours (Fr) : INRA. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/7_JRA/Environnement/EN113-Hassouna-version-def.pdf] (consulté le 04 Janvier 2010).
- HASSOUNI H, ISMAILI-ALAOUI M, AUGUR C, GAIME-PERRAUD I, CHEHEB M, ROUSSOS S. (Juillet 2007) Production de phytases par les champignons filamenteux thermophiles cultivés en FMS. [en-ligne], Rabat (Maroc) : Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II. [<http://www.iav-recherche.ma/documentation/doc/28.pdf>] (consulté le 17 Janvier 2010).
- HENIHAN AM, LEAHY MJ, LEAHY JJ, CUMMINS E, KELLEHER BP. (2003) Emissions modeling of fluidised bed co-combustion of poultry litter and peat. *Bioresource Technology*, **87**(3), 289-294.
- HSEU ZY. (2004) Evaluating heavy metal contents in nine composts using four digestion methods. *Bioresource Technology*, **95**(1), 53-59.
- HUBER-EICHER B, SEBO F. (2001) Reducing feather pecking when raising laying hen chicks in aviary systems. *Applied Animal Behaviour Science*, **73**(1), 59-68.

- ICHIDA JM, KRIZOVA L, LEFEVRE CA, KEENER HM, ELWELL DL, BURTT EH Jr. (2001) Bacterial inoculum enhances keratin degradation and biofilm formation in poultry compost. *Journal of Microbiological Methods*, **47**(2), 199-208.
- ITAVI. (1997a) Les litières. *Sciences et Techniques Avicoles*, **Hors-Série Septembre 1997**, 43-47.
- ITAVI. (1997b) L'ammoniac. *Sciences et Techniques Avicoles*, **Hors-Série Septembre 1997**, 49-52.
- ITAVI. (2001a) Les émissions atmosphériques. *Sciences et Techniques Avicoles*, **Hors-Série Septembre 2001**, 19-24.
- ITAVI (2001b) Les déjections avicoles. *Sciences et Techniques Avicoles*, **Hors-Série Septembre 2001**, 27-33.
- ITAVI. (2009) Guide d'élevage aviculture fermière – quelques repères pour les éleveurs professionnels commercialisant en circuits courts. [en-ligne] Paris (Fr) :
- ITAVI. [http://www.itavi.asso.fr/elevage/aviculture_ferriere/guide_elevage_volailles_ferrieres.php] (consulté le 01 Décembre 2009).
- JACKSON BP, SEAMAN JC, BERTSCH PM. (2006a) Fate of arsenic compounds in poultry litter upon land application. *Chemosphere*, **65**(11), 2028-2034.
- JACKSON DJ, RUDE BJ, KARANJA KK, WHITLEY NC. (2006b) Utilization of poultry litter pellets in meat goat diets. *Small Ruminant Research*, **66**(1-3), 278-281.
- JACQUET M. (2007) Guide pour l'installation en production avicole. 2^{ème} partie. La production de poulets de qualité différenciée : mise en place et résultats. [en-ligne] Gembloux (Belgique) :
- FACW. [<http://www.facw.be/dossierstechniques/guide-l-installation-2-me-partie.pdf>] (consulté le 22 Décembre 2009)
- JAMAGNE M. (1973) *Contribution à l'étude pédogénétique des formations loessiques du Nord de la France*. Thèse de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. 445 p.
- JANGID K, WILLIAMS MA, FRANZLUEBBERS AJ, SANDERLIN JS, REEVES JH, JENKINS MB, ENDALE DM, COLEMAN DC, WHITMAN WB. (2008) Relative impacts of land-use, management intensity and fertilization upon soil microbial community structure in agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**(11), 2843-2853.
- JENKINS MB, ENDALE DM, SCHOMBERG HH, SHARPE RR. (2006) Fecal bacteria and sex hormones in soil and runoff from cropped watersheds amended with poultry litter. *Science of The Total Environment*, **358**(1-3), 164-177.
- JENKINS MB, TRUMAN CC, SIRAGUSA G, LINE E, BAILEY JS, FRYE J, ENDALE DM, FRANKLIN DH, SCHOMBERG HH, FISHER DS, SHARPE RR. (2008) Rainfall and tillage effects on transport of fecal bacteria and sex hormones 17 β -estradiol and testosterone from broiler litter applications to a Georgia Piedmont Ultisol. *Science of The Total Environment*, **403**(1-3), 154-163.
- JENKINS MB, ENDALE DM, SCHOMBERG HH, HARTEL PG, CABRERA ML. (2009) 17 β -Estradiol and testosterone in drainage and runoff from poultry litter applications to tilled and no-till crop land under irrigation. *Journal of Environmental Management*, **90**(8), 2659-2664.
- JEREMIAH LE, GIBSON LL. (2003) The effect of dietary poultry litter supplementation on beef chemical, cooking, and palatability properties and consumer acceptance. *Food Research International*, **36**(9-10), 943-948.
- KANG MS, SRIVASTAVA P, TYSON T, FULTON JP, OWSLEY WF, YOO KH. (2008) A comprehensive GIS-based poultry litter management system for nutrient management planning and litter transportation. *Computers and Electronics in Agriculture*, **64**(2), 212-224.
- KASTNER JR, MILLER J, DAS KC. (2009) Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars. *Journal of Hazardous Materials*, **164**(2-3), 1420-1427.

- KELLEHER BP, LEAHY JJ, HENIHAN AM, O'DWYER TF, SUTTON D, LEAHY MJ. (2002) Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*, **83**(1), 27-36.
- KHAN SA, NAWAZ MS, KHAN AA, HOPPER SL, JONES RA, CERNIGLIA CE. (2005) Molecular characterization of multidrug-resistant *Enterococcus* spp. from poultry and dairy farms: detection of virulence and vancomycin resistance gene markers by PCR. *Molecular and Cellular Probes*, **19**(1), 27-34.
- KIM SS, AGBLEVOR FA, LIM J. (2009) Fast pyrolysis of chicken litter and turkey litter in a fluidized bed reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **15**(2), 247-252.
- KRAEUTLER L, LEVASSEUR JP. (2001) Mesurer la maturité d'un compost. [en-ligne], Digne les Bains (Fr) : GESPER, document LKVINCI 0501. [<http://compostage.free.fr/html/documents/compostmatur.pdf>] (consulté le 04 Janvier 2010).
- KWAK WS, KANG JS. (2006) Effect of feeding food waste-broiler litter and bakery by-product mixture to pigs. *Bioresource Technology*, **97**, 243-249.
- KWAK WS, HUH JW, MACCASKEY TA. (2005) Effect of processing time on enteric bacteria survival and on temperature and chemical composition of broiler poultry litter processed by two methods. *Bioresource Technology*, **96**(14), 1529-1536.
- LAROUSSE. (2009) *Larousse.fr : encyclopédie collaborative et dictionnaires gratuits en ligne*. [en-ligne], Mise à jour le 14 Janvier 2010. [<http://www.larousse.fr/>] (consulté le 20 Décembre 2009).
- LESCOAT P, TRAVEL A, NYS Y. (2005) Lois de réponses des volailles de chair à l'apport de phosphore. *INRA Productions Animales*, **18**(3), 193-201.
- LIECHTY HO, BLAZIER MA, WIGHT JP, GASTON LA, RICHARDSON JD, FICKLIN RL. (2009) Assessment of repeated application of poultry litter on phosphorus and nitrogen dynamics in loblolly pine: Implications for water quality. *Forest Ecology and Management*, **258**(10), 2294-2303.
- LIMA IM, MARSHALL WE. (2005a) Utilization of turkey manure as granular activated carbon: Physical, chemical and adsorptive properties. *Waste Management*, **25**, 726-732.
- LIMA IM, MARSHALL WE. (2005b) Granular activated carbons from broiler manure: physical, chemical and adsorptive properties. *Bioresource Technology*, **96**, 699-706.
- LIMA IM, MCALOON A, BOATENG AA. (2008) Activated carbon from broiler litter: Process description and cost of production. *Biomass and Bioenergy*, **32**(6), 568-572.
- LU J, SANCHEZ S, HOFACRE C, MAURER JJ, HARMON BG, LEE MD. (2003) Evaluation of broiler litter with reference to the microbial composition as assessed by using 16S rRNA and functional gene markers. *Applied and Environmental Microbiology*, **96**(2), 901-908.
- LUBAC S, FORICHON T, MARTIN PEULET G, AUBERT C, ROBIN P. (Mars 2005) Quantification et étude des paramètres de variation des émissions de gaz et d'odeurs en élevage de canards de Barbarie de type "Louisiane". In : *Sixièmes journées de la recherche avicole*. [en-ligne], St Malo (Fr) : ITAVI, INRA. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/6_JRA/Environnement/B47-LUBAC-CD.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).
- MAGBANUA Jr BS, ADAMS TT, JOHNSTON P. (2001) Anaerobic codigestion of hog and poultry waste. *Bioresource Technology*, **76**, 165-168.
- MAHOUACHI M, HADDAD L, KAYOULI C, THEWIS A, BECKERS Y. (2003) Effects of the nature of nitrogen supplementation on voluntary intake, rumen parameters and ruminal degradation of dry matter in sheep fed oat silage-based diets. *Small Ruminant Research*, **48**(3), 181-187.

- MAURER V, AMSLER Z, PERLER E, HECKENDORN F. (2009) Poultry litter as a source of gastrointestinal helminth infections. *Veterinary Parasitology*, **161**(3-4), 255-260.
- MCCLINTOCK NC. (2005) Production de compost et usage dans les systèmes agricoles durables. In : *Notes prises sur le terrain à l'attention des agriculteurs*. [en-ligne], Raleigh (Caroline du Nord, Etats-Unis d'Amérique) : Center for Environmental Farming System. [http://oacc.info/Docs/Cefs/Field_Compost_f.pdf] (consulté le 12 Janvier 2010).
- MCINTOSH CS, PARK TA, KARNUM C. (2000) The potential impact of imposing best management practices for nutrient management on the US broiler industry. *Journal of Environmental Management*, **60**(2), 145-154.
- MCKINLEY B, BROOME M, OLDHAM L. (1914 mis à jour 2000) Poultry Nutrient Management through livestock feedstuffs. [en-ligne] Extension Service of Mississippi State University cooperating with U.S. Department of Agriculture, publication M1146. [<http://msucare.com/pubs/misc/m1146.htm>] (consulté le 01 Décembre 2009) Published in furtherance of Acts of Congress, May 8 and June 30, 1914.
- METHANISATION.INFO. (2009) *Méthanisation.info – Effluents, biogaz, digesteur*. [en-ligne], Narbonne (Fr) : INRA. [<http://www.methanisation.info/>] (consulté le 10 Janvier 2010).
- MIRABITO L, ZIEMNIAK L, CHEVALIER D. (Mars 2007) Cinétique des pododermatites chez les poulets de chair élevés sur paille ou copeaux en élevage commercial. In : *Septièmes journées de la recherche avicole*. [en-ligne], Tours (Fr) : ITAVI, Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de la Loire. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/7_JRA/Environnement/B74-MIRABITO-version-def.pdf] (consulté le 02 janvier 2010).
- MOINECOURT MAE. (2003) *L'alimentation en calcium de la truie reproductrice*. Thèse Med. Vét. Toulouse, 90p.
- MOORE JE, WATABE M, STEWART A, B. MILLAR C, RAO JR. (2009) A novel challenge test incorporating irradiation (⁶⁰Co) of compost sub-samples to validate thermal lethality towards pathogenic bacteria. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **72**(1), 144-153.
- MOTAVALLI PP, ANDERSON SH, PENGHTAMKEERATI P, GANTZER CJ. (2003a) Use of soil cone penetrometers to detect the effects of compaction and organic amendments in claypan soils. *Soil and Tillage Research*, **74**(2), 103-114.
- MOTAVALLI PP, ANDERSON SH, PENGHTAMKEERATI P. (2003b) Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability, and physical properties of a claypan soil. *Field Crops Research*, **84**(3), 303-318.
- MUIA JMK, TAMMINGA S, MBUGUA PN. (2000) Effect of supplementing napier grass (*Pennisetum purpureum*) with sunflower meal or poultry litter-based concentrates on feed intake, live-weight changes and economics of milk production in Friesian cows. *Livestock Production Science*, **67**(1-2), 89-99.
- MUIA JMK, TAMMINGA S, MBUGUA PN, KARIUKI JN. (2001) Effect of supplementing napier grass (*Pennisetum purpureum*) with poultry litter and sunflower meal based concentrates on feed intake and rumen fermentation in Friesian steers. *Animal Feed Science and Technology*, **92**(1-2), 113-126.
- MUNCHENER RUCK MUNICH RE GROUP. (2004) Combustion en lit fluidisé dans les centrales thermiques. In : *Guide technique pour les souscripteurs*. [en-ligne] München (Allemagne) : Münchener Rückversicherungsgesellschaft. [http://www.munichre.com/publications/302-00421_fr.pdf] (consulté le 10 Janvier 2010).
- NANDI S, MAURER JJ, HOFACRE C, SUMMERS AO. (2004) Gram-positive bacteria are a major reservoir of Class 1 antibiotic resistance integrons in poultry litter. *PNAS*, **101**(18), 7118-7122.
- NICHOLSON FA, CHAMBERS BJ, WALKER AW. (2004) Ammonia Emissions from Broiler Litter and Laying Hen Manure Management Systems. *Biosystems Engineering*, **89**(2), 175-185.

- NOEL L, CARRE J, LEGEAS M. (2002) Le compostage des déchets. In : *Rapport d'étude : éléments pour la prise en compte des effets des unités de compostage de déchets sur la santé des populations riveraines*. [en-ligne], Rennes (Fr) : Étude FNADE-MEDD réalisée par l'ENSP. [http://www.sante.gouv.fr/html/dossiers/etud_impact/ensp1_ei52.pdf] (consulté le 13 Janvier 2010).
- NYAKATAWA EZ, REDDY KC, LEMUNYON JL. (2001a) Predicting soil erosion in conservation tillage cotton production systems using the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Soil and Tillage Research*, **57**(4), 213-224.
- NYAKATAWA EZ, REDDY KC, SISTANI KR. (2001b) Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. *Soil and Tillage Research*, **58**(1-2), 69-79.
- NYAKATAWA EZ, REDDY KC, BROWN GF. (2001c) Residual effect of poultry litter applied to cotton in conservation tillage systems on succeeding rye and corn. *Field Crops Research*, **71**(3), 159-171.
- NYAKATAWA EZ, JAKKULA V, REDDY KC, LEMUNYON JL, NORRIS BE Jr. (2007) Soil erosion estimation in conservation tillage systems with poultry litter application using RUSLE 2.0 model. *Soil and Tillage Research*, **94**(2), 410-419.
- OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT OFEV. (2009) Phosphore total. In : *OFEV – Phosphore total*. [en-ligne], Mise à jour le 06 Juillet 2009. [<http://www.bafu.admin.ch/chemikalien/prtr/07159/07189/index.html?lang=fr>] (consulté le 06 Janvier 2010).
- OLSSON IAS, KEELING LJ. (2005) Why in earth? Dustbathing behaviour in jungle and domestic fowl reviewed from a Tinbergian and animal welfare perspective. *Applied Animal Behaviour Science*, **93**(3-4), 259-282.
- OLSSON IAS, KEELING LJ, DUNCAN IJH. (2002) Why do hens sham dustbathe when they have litter? *Applied Animal Behaviour Science*, **76**(1), 53-64.
- OMAFRA. (Août 2002) Protocoles ministériels de mise en œuvre du règlement de l'Ontario pris en application de la Loi sur la gestion des éléments nutritifs de 2002. [en-ligne], Guelph (Ontario, Canada) : OMAFRA. . [http://www.omafra.gov.on.ca/french/agops/nut_units.pdf] (consulté le 14 Janvier 2010).
- OMEIRA N, BARBOUR EK, NEHME PA, HAMADEH SK, ZURAYK R, BASHOUR I. (2006) Microbiological and chemical properties of litter from different chicken types and production systems. *Science of The Total Environment*, **367**(1), 156-162.
- PAUDEL KP, ADHIKARI M, MARTIN NR Jr. (2004) Evaluation of broiler litter transportation in northern Alabama, USA. *Journal of Environmental Management*, **73**, 15-23.
- PAYNE M. (Mise à jour le 13 Juillet 2007) Épandage de biosolides sur les terres agricole : le phosphore. *Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales*. [en-ligne] Guelph (Ontario, Canada): OMAFRA. [http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/field/news/croptalk/2003/ct_0903a5.htm] (consulté le 06 Janvier 2010).
- PENGTHAMKEERATI P, MOTAVALLI PP, KREMER RJ, ANDERSON SH. (2005) Soil carbon dioxide efflux from a claypan soil affected by surface compaction and applications of poultry litter. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **109**(1-2), 75-86.
- PENGTHAMKEERATI P, MOTAVALLI PP, KREMER RJ, ANDERSON SH. (2006) Soil compaction and poultry litter effects on factors affecting nitrogen availability in a claypan soil. *Soil and Tillage Research*, **91**(1-2), 109-119.
- PHILLIPS VR, COWELL DA, SNEATH RW, CUMBY TR, WILLIAMS AG, DEMMERS TGM, SANDARS DL. (1999) An assessment of ways to abate ammonia emissions from UK livestock buildings and waste stores. Part 1: ranking exercise. *Bioresource Technology*, **70**(2), 143-155.
- PONTER A. (2009a) *Définition des termes d'alimentation*. Polycopié. École Nationale Vétérinaire d'Alfort, Unité pédagogique de Zootechnie, Économie Rurale. 2p.

- PONTER A. (2009b) *Influence de l'alimentation sur la production laitière. Taux butyreux*. Polycopié. École Nationale Vétérinaire d'Alfort, Unité pédagogique de Zootechnie, Économie Rurale, 13p.
- POTE DH, LORY JA, ZHANG H. (2003) Does initial soil P level affect water-extractable soil P response to applied P? *Advances in Environmental Research*, **7**(2), 503-509.
- POTE DH, WAY TR, SISTANI KR, MOORE PA Jr. (2009) Water-quality effects of a mechanized subsurface-banding technique for applying poultry litter to perennial grassland. *Journal of Environmental Management*, **90**(11), 3534–3539.
- PRATT RG, TEWOLDE H. (2009) Soil fungal population levels in cotton fields fertilized with poultry litter and their relationships to soil nutrient concentrations and plant growth parameters. *Applied Soil Ecology*, **41**(1), 41-49.
- PREUSCH PL, TAKEDA F, TWORKOSKI TJ. (2004) N and P uptake by strawberry plants grown with composted poultry litter. *Scientia Horticulturae*, **102**(1), 91-103.
- PRÉVOSTO B, CURT T, MOARES DOMINGUEZ C, DAMBRINE E, POUTIER F, POLLIER B. (2002) Les sols sous boisements spontanés de bouleau et de pin sylvestre dans la Chaîne des Puys. Influence du *substratum* et de l'utilisation ancienne, conséquences sur la végétation. *Étude et Gestion des Sols*, **9**(4), 252-267.
- PRIYADARSAN S, ANNAMALAI K, SWEETEN JM, HOLTZAPPLE MT, MUKHTAR S. (2005) Co-gasification of blended coal with feedlot and chicken litter biomass. *Proceedings of the Combustion Institute*, **30**, 2973-2980.
- QIU G, GUO M. (2010) Quality of poultry litter-derived granular activated carbon. *Bioresource Technology*, **101**(1), 379–386.
- RANKINS Jr DL, POORE MH, CAPUCILLE DJ, ROGERS GM. (2002) Recycled poultry bedding as cattle feed. *Vet Clin Food Anim*, **18**, 253-266.
- RAO AG, T. REDDY TSK, PRAKASH SS, VANAJAKSHI J, JOSEPH J, JETTY A, A. REDDY R, SARMA PN. (2008) Biomethanation of poultry litter leachate in UASB reactor coupled with ammonia stripper for enhancement of overall performance. *Bioresource Technology*, **99**(18), 8679-8684.
- RAO JR, WATABE M, STEWART TA, MILLAR BC, MOORE JE. (2007) Pelleted organo-mineral fertilisers from composted pig slurry solids, animal wastes and spent mushroom compost for amenity grasslands. *Waste Management*, **27**(9), 1117-1128.
- RAVIER B. (2009) Les mots du développement durable. *Société d'équipement du Rhône et de Lyon*. [en-ligne], Lyon (Fr) : SERL. [http://serl.fr/index.php/serl/content/download/2095/18272/file/Les_mots_du%20_Développement%20_Durable_serl.pdf] (consulté le 04 Janvier 2010).
- REDDY KC, MALIK RK, REDDY SS, NYAKATAWA EZ. (2007) Cotton growth and yield response to nitrogen applied through fresh and composted poultry litter. *Journal of Cotton Science*, **11**, 26-34.
- REDDY SS, NYAKATAWA EZ, REDDY KC, RAPER RL, REEVES DW, LEMUNYON JL. (2009) Long-term effects of poultry litter and conservation tillage on crop yields and soil phosphorus in cotton-cotton-corn rotation. *Field Crops Research*, **114**, 311-319.
- REFRÉGIER-PETTON J, ROSE N, DENIS M, SALVAT G. (2001) Risk factors for *Campylobacter* spp. contamination in French broiler-chicken flocks at the end of the rearing period. *Preventive Veterinary Medicine*, **50**(1-2), 89-100.
- RÉPÉRANT JM, SOUILLARD R, TOUX JY, LOYAU M, ROBERTON JL. (Mars 2007) Coccidiose chronique : suivi parasitologique de deux élevages de poulets. In : *Septièmes journées de la recherche avicole*. [en-ligne], Tours (Fr) : URAST, Coopérative le Gouëssant, CEVA.

[http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/7_JRA/pathologie/P59-REPERANT-version-def.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).

RIDGE B. (1995) Phosphorus Cycle. In : *Dynamics of the biosphere*. [en-ligne] Tokyo (Japon) : International Christian University. [<http://mac122.icu.ac.jp/gen-ed/ecosystem-jpgs/phosphorus-cycle.jpg>] (consulté le 10 Janvier 2010).

RITZ CW, MERKA WC. (2004 mis à jour Juillet 2009) Maximizing Poultry Manure Use Through Nutrient Management Planning. *Georgia Cooperative Extension Service, College of Agriculture and Environmental Sciences*. [en-ligne], Athens : University of Georgia, Bulletin 1245. [<http://pubs.caes.uga.edu/caespubs/pubcd/B1245>] (consulté le 01 Décembre 2009).

ROACH S, ISENHART L, MCKENNA L, CUNNINGHAM M. (2009) Filthy feed – The risky and unregulated practice of feeding poultry litter to cattle. *Food Animal Concerns Trust*, [en-ligne] Chicago (Illinois, Etats-Unis d'Amérique) : FACT. [http://www.foodanimalconcerns.org/PDF/filthy_feed_report.pdf] (consulté le 01 Décembre 2009).

RODHE L, KARLSSON S. (2002) Ammonia Emissions from Broiler Manure – Influence of Storage and Spreading Method. *Biosystems Engineering*, **82**(4), 455-462.

ROSE N, BEAUDREAU F, DROUIN P, TOUX JY, V. COLIN RP. (1999) Risk factors for *Salmonella enterica* subsp. *enterica* contamination in French broiler-chicken flocks at the end of the rearing period. *Preventive Veterinary Medicine*, **39**(4), 265-277.

SAINJU UM, SENWO ZN, NYAKATAWA EZ, TAZISONG IA, REDDY KC. (2008) Soil carbon and nitrogen sequestration as affected by long-term tillage, cropping systems, and nitrogen fertilizer sources. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **127**(3-4), 234-240.

SALIN C, DELETTRE YR, CANNAVACCIUOLO M, VERNON P. (2000) Spatial distribution of *Alphitobius diaperinus* (Panzer) (Coleoptera: Tenebrionidae) in the soil of a poultry house along a breeding cycle. *European Journal of Soil Biology*, **36**(2), 107-115.

SAUER TJ, COMPSTON SR, WEST CP, HERNANDEZ-RAMIREZ G, GBUR EE, PARKIN TB. (2009) Nitrous oxide emissions from a bermudagrass pasture: Interseeded winter rye and poultry litter. *Soil Biology and Biochemistry*, **41**(7), 1417-1424.

SAUVEUR B. (1993) Les phytases fongiques dans l'alimentation des volailles. *INRA Productions Animales*, **6**(4), 265-267.

SÉTRA-DNP. (1994) La végétalisation. In : *La végétation, outil d'aménagement – Guide technique*. [en-ligne], Bagnex (Fr) : SÉTRA. [<http://cataloguesetra.documentation.equipement.gouv.fr/documents/Cataloguesetra/0000/Dtrf-0000751/DT751.pdf>] (consulté le 10 Janvier 2010).

SISTANI KR, BRINK GE, MCGOWEN SL, ROWE DE, OLDHAM JL. (2003) Characterization of broiler cake and broiler litter, the by-products of two management practices. *Bioresource Technology*, **90**(1), 27-32.

SISTANI KR, SIKORA FJ, RASNAKE M. (2008a) Poultry litter and tillage influences on corn production and soil nutrients in a Kentucky silt loam soil. *Soil and Tillage Research*, **98**(2), 130-139.

SISTANI KR, ADELI, MCGOWEN SL, TEWOLDE H, BRINK GE. (2008b) Laboratory and field evaluation of broiler litter nitrogen mineralization. *Bioresource Technology*, **99**(7), 2603-2611.

SMITH KA, CHARLES DR, MOORHOUSE D. (2000) Nitrogen excretion by farm livestock with respect to land spreading requirements and controlling nitrogen losses to ground and surface waters. Part 2: pigs and poultry. *Bioresource Technology*, **71**(2), 183-194.

- SMITH DR, OWENS PR, LEYTEM AB, WARNEMUENDE EA. (2007) Nutrient losses from manure and fertilizer applications as impacted by time to first runoff event. *Environmental Pollution*, **147**(1), 131-137.
- SOUDI B. (2005) Le compostage des déchets de cultures sous serre et du fumier. *Transfert de Technologie en Agriculture*, **129**, 1-6.
- STEWART G. (2003) Les cultures de couverture – Captage de l’azote à l’automne. In : *Bulletin Grandes Cultures*. [en-ligne], Guelph (Ontario, Canada) : OMAFRA. [http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/field/news/croptalk/2003/ct_0603a5.htm] (consulté le 10 Janvier 2010).
- SUBRAMANIAN B, GUPTA G. (2006) Adsorption of trace elements from poultry litter by montmorillonite clay. *Journal of Hazardous Materials*, **128**(1), 80-83
- SUMNER DR, HALL MR, GAY JD, MACDONALD G, SAVAGE SI, BRAMWELL RK. (2002) Root diseases, weeds, and nematodes with poultry litter and conservation tillage in a sweet corn–snap bean double crop. *Crop Protection*, **21**(10), 963-972.
- SZOZI AA, VANOTTI MB. (2009) Prospects for phosphorus recovery from poultry litter. *Bioresource Technology*, **100**(22), 5461–5465.
- TEWOLDE H, SHANKLE MW, ADELI A, SISTANI KR, ROWE DE. (2009) Macronutrient concentration in plant parts of cotton fertilized with broiler litter in a marginal upland soil. *Soil and Tillage Research*, **105**(1), 1-11.
- TIQUIA SM, TAM NFY. (2000) Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environmental Pollution*, **110**, 535-541.
- TIQUIA SM, TAM NFY. (2002) Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles. *Process Biochemistry*, **37**(8), 869-880.
- TRABUE S, SCOGGIN K, MITLOEHNER F, LI H, BURNS R, XIN H. (2008) Field sampling method for quantifying volatile sulfur compounds from animal feeding operations. *Atmospheric Environment*, **42**(14), 3332-3341.
- TRAVEL A, BOUVAREL I, AUBERT C, CHAGNEAU AM, HALLOUIS JM, JUIN H, RELANDEAU C, BUTIN P, BROZ J, LESSIRE M. (Mars 2005) Réduction des rejets en azote par voie alimentaire chez le dindon en finition à performances constantes. In : *Sixièmes Journées de la Recherche Avicole*. [en-ligne], St Malo (Fr) : ITAVI, INRA. [http://journées-de-la-recherche-foie-gras.org/JRA/Contenu/Archives/6_JRA/Nutrition/N81-TRAVEL-CD.pdf] (consulté le 02 Janvier 2010).
- TURAN NG. (2008) The effects of natural zeolite on salinity level of poultry litter compost. *Bioresource Technology*, **99**(7), 2097-2101.
- TURAN NG, AKDEMIR A, ERGUN ON. (2009) Removal of volatile organic compounds by natural materials during composting of poultry litter. *Bioresource Technology*, **100**(2), 798-803.
- USDA. (Mai 2009) Poultry – Production and Value 2008 Summary. *National Agricultural Statistics Service* [en-ligne], Washington (District de Columbia, Etats-Unis d’Amérique) : USDA. [<http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/current/PoulProdVa/PoulProdVa-05-29-2009.pdf>] (consulté le 29 décembre 2009).
- VAN RYSSEN JBJ, MAVIMBELA DT. (1999) Broiler litter as a source of selenium for sheep. *Animal Feed Science and Technology*, **78**, 263-272.
- WATSON DW, KAUFMAN PE, RUTZ DA, GLENISTER CS. (2001) Impact of the Darkling Beetle *Alphitobius diaperinus* (Panzer) on Establishment of the Predaceous Beetle *Carcinops pumilio* (Erichson) for *Musca domestica* Control in Caged-Layer Poultry Houses. *Biological Control*, **20**(1), 8-15.

WILLIAMS RB. (1998) Epidemiological aspects of the use of live anticoccidial vaccines for chickens. *Internal Journal of Parasitology*, **28**, 1089-1098.

WIKIPÉDIA. (2001 mis à jour 23 Décembre 2009) *Wikipédia, l'encyclopédie libre*. [en-ligne] 2001, mis à jour le 23 Décembre 2009. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikipédia:Accueil_principal] (consulté le 04 Janvier 2010).

YING GG, KOOKANA RS, RU YJ. (2002) Occurrence and fate of hormone steroids in the environment. *Environment International*, **28**(6), 545-551.

ZHU S, LEE SW. (2005) Co-combustion performance of poultry wastes and natural gas in the advanced Swirling Fluidized Bed Combustor (SFBC). *Waste Management*, **25**(5), 511-518.

ANNEXE 1 : Glossaire général

*Utilisation du glossaire : Tous les mots ou expressions définies dans le glossaire apparaissent **en gras** dans le texte de la thèse.*

Adsorption :

C'est la « rétention à la surface d'un solide, dit adsorbant, des molécules d'un gaz ou d'une substance en solution ou en suspension (Groupement Français de la Combustion, 2004).

La **surface spécifique** BET (Brunner-Emmet-Teller) est un test utilisé pour estimer la capacité d'**adsorption** d'un matériau.

Air primaire :

« L'**air primaire** comprend la totalité de l'air entrant dans le four par le brûleur. Il permet une **combustion** immédiate mais partielle du **combustible**, et l'accrochage de la flamme » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Air secondaire :

« L'air introduit ultérieurement dans le four pour assurer la **combustion** totale est appelé, selon les configurations industrielles particulières, **air secondaire**, air tertiaire, ... » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Amendement :

En agriculture, c'est une « substance qui a pour effet d'améliorer les propriétés physiques des sols auxquels on l'incorpore et peut en modifier les propriétés chimiques et biologiques » (Larousse, 2009).

Anas de lin :

« Parties ligneuses des plantes textiles, principalement du lin, situées en arrière de la fibre et réduites au cours de l'opération de broyage-teillage en petites particules constituant un sous-produit utilisé pour la fabrication de panneaux d'agglomérés, pour l'alimentation d'animaux d'élevage et comme **combustible** » (Larousse, 2009).

Andain :

« Alignement d'herbe, de foin ou de céréales que le faucheur ou la machine laisse au fur et à mesure qu'avance le travail » (Larousse, 2009).

Bac à poussière :

C'est un bac contenant des matériaux secs et friables, permettant l'expression du comportement de bain de poussière. Il est présent dans toutes les cages dites « aménagées ». Il peut mesurer, à titre d'exemple 75 cm² (Guéméné et Faure, 2004).

Bassin versant :

« Portion connexe de territoire dont les eaux de **ruissellement** convergent vers un même exutoire. Un bassin important est généralement drainé par un cours d'eau pérenne et ses tributaires. Un bassin élémentaire n'a pas nécessairement de drain pérenne s'il est en position perchée par rapport à la nappe phréatique sous-jacente et si la nature du sol et du sous-sol permet l'infiltration. Le bassin de surface ou bassin hydrographique correspond généralement à un bassin hydrogéologique, mais avec de nombreuses exceptions dues à la nature anisotrope et fissurée du sous-sol. Des traçages (par colorants) permettent de mettre en évidence les relations entre sous-bassins » (Calandre et Janoco, 2006).

Biocénose :

« Ensemble des animaux, des plantes et des micro-organismes qui vivent de façon permanente et équilibrée dans un même lieu, qui est leur biotope » (Larousse, 2009).

Biocontrôle :

« Le terme **biocontrôle** désigne l'utilisation d'organismes vivants, comme les virus, les insectes et les champignons, pour remplacer les insecticides chimiques dans la lutte contre une espèce nuisible » (Baril, 2008)

Biodisponibilité :

C'est la « propriété d'une espèce chimique ou d'un élément présent dans le sol d'être plus ou moins absorbé par les organismes vivants *via* la solution du sol ». Lorsqu'il s'agit de plantes, on parle de phytodisponibilité.

Cette propriété s'applique aussi bien aux éléments nutritifs (P, K) qu'aux **oligo-éléments** ou autres métaux potentiellement toxiques. La **biodisponibilité** implique le franchissement d'une barrière biologique : parois cellulaires (racines ou stomates chez les végétaux supérieurs).

Biodisponibilité et phytodisponibilité résultent de l'interaction de trois séries de facteurs :

- espèces chimiques présentes dans la solution du sol (nature et concentration),
- espèce et variété de l'organisme vivant considéré (génom),
- propriétés physico-chimiques et microbiologiques du sol » (Baize, 2006).

Biodégradation :

C'est la « décomposition des **effluents** industriels ou des déchets domestiques par des bactéries, généralement en milieu aquatique. (Synonyme : dégradation.) Dans les sols, [c'est l'] ensemble des phénomènes biologiques qui aboutissent à la décomposition des débris végétaux et des substances humiques en CO₂, H₂O, NH₃ (minéralisation) » (Larousse, 2009).

Bio-huile :

C'est l'huile obtenue à partir de la **biomasse**, dans des réacteurs contenant des micro-algues, qui piègent le dioxyde de **carbone** et les oxydes d'**azote**. Cette huile est ensuite destinée à fournir des biocarburants (Danielo, 2005).

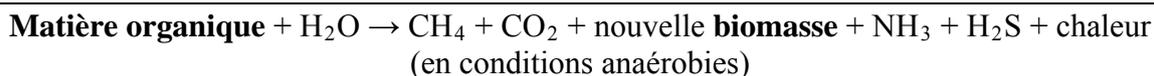
Biomasse :

C'est la « masse totale de l'ensemble des êtres vivants occupant, à un moment donné, un biotope bien défini. (Ainsi conçue, la **biomasse** d'une forêt comprend aussi bien les arbres, leurs oiseaux et leurs insectes que le sous-bois ou la faune microscopique du sol) ».

On peut également la définir comme la « masse vivante, considérée du point de vue de l'énergie que l'on peut en obtenir par **combustion** ou **fermentation** (gaz de broussaille, gaz de **fumier**, feu de bois » (Larousse, 2009).

Biométhanisation :

Elle implique la dégradation et la stabilisation de matériel organique sous conditions anaérobies par des organismes microbiens et conduit à la formation de méthane et de produits inorganiques comme le dioxyde de **carbone** :



C'est la « formation du méthane à partir de l'hydrogène et du monoxyde de **carbone**, intervenant dans la **gazéification** du charbon » (Larousse, 2009).

Biocombustible solide ou **biosolide** :

« Les **biocombustibles solides** prennent le plus souvent la forme de **granulés**, de copeaux, de briquettes ou de bûches. Ils peuvent être produits à partir de différents types de résidus : bois, cultures et meuneries. Les **fumiers** peuvent également être utilisés pour leur production » (Brodeur *et al.*, 2008).

Biotique :

« Se dit des facteurs liés à l'activité des êtres vivants et agissant sur la distribution des espèces animales et végétales d'un biotope donné » (Larousse, 2009).

Bisulfate de sodium (ou **hydrogénosulfate de sodium**) :

NaHSO_4 C'est un sel acide (ampholyte), utilisé pour diminuer le pH, comme additif alimentaire et comme accumulateur de chaleur. (Wikipédia, 2009)

Boues activées :

Lors du traitement de l'eau, l'épuration par **boues activées** consiste à mettre en contact les eaux usées avec un mélange riche en bactéries par brassage pour dégrader la **matière organique** en suspension ou dissoute. Il y a une aération importante pour permettre l'activité des bactéries et la dégradation de ces matières, suivie d'une décantation à partir de laquelle on renvoie les boues riches en bactéries vers le bassin d'aération (Wikipédia, 2009).

Boues d'épuration :

« Les **boues d'épuration** (urbaines ou industrielles) sont les principaux déchets produits par une station d'épuration à partir des **effluents** liquides » (Wikipédia, 2009).

Brout :

« Jeune pousse d'arbre consommée par les animaux » (Larousse, 2009).

Carbonisation (« **charring** » en anglais) :

C'est la « formation d'un résidu carboné plus ou moins pur par réaction de **pyrolyse** ou au cours d'une **combustion** incomplète. Comme pour toute réaction pyrolytique, la **carbonisation** est un processus complexe où prennent place en concurrence déshydrogénation, condensation, transfert

d'hydrogène, isomérisation...(...). La température finale de **pyrolyse** régit le degré de **carbonisation** et le contenu résiduel en éléments autres que le **carbone** » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Carburant (« fuel » en anglais) :

Ce mot est « dérivé de carbure, sous-entendu carbure d'hydrogène, nom ancien pour hydrocarbure. Dans sa signification ancienne et classique, un **carburant** est un **combustible** constitué par des molécules carbonées. On considère plutôt maintenant qu'un **carburant** est un **combustible** destiné à l'alimentation d'une machine thermique, qu'il soit ou non carboné » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Carboxyméthyle Pyrazole :

C'est un inhibiteur de la **nitrification** de seconde génération. Les inhibiteurs de la **nitrification** ralentissent la transformation de l'ammonium en nitrate dans les **engrais**, ce qui génère une libération progressive des nitrates pour les végétaux (Reddy *et al.*, 2007).

Charbon activé ou actif :

C'est un « médicament utilisé pour ses propriétés d'**adsorption** (fixation par simple contact) des gaz, des liquides et des toxiques » (Larousse, 2009).

Charbon bitumineux :

« C'est un charbon gras souvent cokéifiable donnant un pourcentage important de goudron à la distillation » (Larousse, 2009).

Charge volumique appliquée (CVA) ou taux de chargement organique :

Elle « représente la charge appliquée à un certain volume de réacteur, s'exprime en kg de DCO par m³ de réacteur et par jour. Elle permet de comparer les conditions d'alimentation de différents digesteurs. C'est le paramètre de charge le plus utilisé en particulier pour les réacteurs à **biomasse** fixée pour lesquels l'accès à la concentration en **biomasse** est impossible » (Méthanisation.info, 2009).

Coefficient d'isolation U (anciennement K) :

Il s'agit du coefficient de transmission thermique (aussi appelé **coefficient d'isolation** thermique). Il s'exprime en W/m²K et détermine la déperdition de chaleur (exprimée en Watt) à travers une surface (exprimée en m²) en fonction de la différence de température (exprimée en K) de chaque côté de celle-ci. Le coefficient (anciennement K) s'est imposé comme étant la valeur la plus efficace pour définir les capacités des matériaux isolants (Ravier, 2009).

Coefficient d'Utilisation Digestive (CUD) :

Il est exprimé en pourcentage. Pour un **nutriment**, on le calcule de la façon suivante :

$\frac{\text{Ingéré} - \text{Fécal}}{\text{Ingéré}} \times 100.$
--

Il correspond à l'absorption intestinale de ce **nutriment** (d'après Moinecourt, 2003).

Comburant :

« Espèce chimique généralement constituée d'atomes fortement électronégatifs, ou dans laquelle ces atomes prédominent, et qui est susceptible de donner lieu à une **combustion** en réagissant avec un **combustible** » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Combustible :

C'est une « espèce chimique généralement constituée d'atomes faiblement électronégatifs, ou dans laquelle ces atomes prédominent, et qui est susceptible de donner lieu à une **combustion** en réagissant avec un **comburant** » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Combustion (« combustion », « burning » en anglais) :

C'est une « réaction chimique globalement et généralement fortement exothermique, autonome, susceptible de s'accélérer brutalement et d'être accompagnée d'émission de **rayonnements**. Dans le sens usuel, la **combustion** est la réaction entre un **combustible** et le dioxygène pur, le dioxygène dilué (air) ou une espèce chimique riche en dioxygène (ozone, peroxyde d'hydrogène, acide nitrique) » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Compactibilité :

C'est la capacité d'un volume solide à être aggloméré en une forme compacte avec une force spécifiée. Celle-ci diffère de la **compressibilité** qui implique une diminution du volume sous pression (Bernhart *et al.*, 2010).

Compaction :

C'est une « densification résultant d'une compression ou d'un traitement thermomécanique » (Larousse, 2009).

Complexation :

« Formation d'un complexe chimique à partir d'un ion ou d'un atome métallique ». Un complexe est une « combinaison dans laquelle plusieurs molécules ou ions, saturés en apparence, sont unis les uns aux autres, et dans laquelle les propriétés chimiques de ces molécules ou de ces ions ont disparu.

Substance formée par l'ensemble de deux ou plusieurs groupements chimiques liés entre eux. (Les complexes sont formés grâce à la propriété qu'ont de nombreux ions, surtout de **métaux lourds**, d'attirer et de grouper autour d'eux des ions ou des molécules appelés ligands ou coordinats) » (Larousse, 2009).

Compost :

« Produit du **compostage** des déchets » (Larousse, 2009).

Compostage :

C'est la « mise en **fermentation** de certains déchets agricoles ou urbains, de façon à récupérer des éléments riches en minéraux et **matière organique**, qui sont ensuite incorporés aux terres agricoles afin de les enrichir » (Larousse, 2009).

Compressibilité :

C'est une diminution du volume sous pression (Bernhart *et al.*, 2010). La **compressibilité** est la mesure de l'augmentation de la force des matériaux type poudre avec l'augmentation de la pression de consolidation (Qiu et Guo, 2010).

Conditionneur de sol :

Les objectifs du **conditionneur de sol** sont les suivants : augmenter la résistance du sol à l'érosion, maintenir en place les graines et éventuellement le mulch et améliorer les propriétés physico-chimiques du sol (en particulier la rétention de l'eau et des éléments fertilisants) (Sétra-DNP, 1994).

Conduction :

« Passage de la chaleur (...) d'un point à un autre d'un corps sous l'action d'une différence de température » (Larousse, 2009).

Convection :

« Mouvement vertical de l'air, ascendant ou descendant, par opposition à l'advection, qui désigne les mouvements horizontaux.

Transfert de chaleur accompagné d'un transport de matière à l'état de fluide » (Larousse, 2009).

Craquage :

« Procédé thermique ou catalytique visant à accroître la proportion relative des composants légers d'une huile par modification de la structure chimique de ses composants » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Culture de couverture :

Dans le contexte de la gestion des **nutriments**, une **culture de couverture** efficace doit :

- 1) fixer ou séquestrer l'**azote** disponible à l'automne,
- 2) empêcher la **lixiviation** de l'**azote** durant l'automne, l'hiver et le printemps, alors que la demande des cultures est faible,
- 3) libérer l'**azote** juste à temps pour la période de croissance rapide du maïs.

L'**azote** disponible à l'automne peut provenir des réserves non utilisées par la culture, ou encore de l'application de **fumier** à la fin de l'été ou à l'automne. La capacité d'une **culture de couverture** à capter cet **azote** à l'automne dépend principalement de sa propriété à croître rapidement après la récolte de la culture principale (Stewart, 2003).

Curage :

« Action de nettoyer en raclant » (Larousse, 2009).

Cyclone : (dans une chambre de **combustion à lit fluidisé**)

« Appareil conico-cylindrique utilisé pour extraire des gouttes et des particules d'un écoulement gazeux au moyen de la force centrifuge. Le gaz entre tangentiellement et les forces d'inertie entraînent les particules vers la paroi extérieure, où elles glissent vers le bas de l'appareil, tandis que le gaz purifié est éjecté à travers l'orifice cylindrique de sortie en haut de l'appareil » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Déchets solides :

Voir **biocombustible solide**.

Décomprimage :

Il consiste à retirer entre chaque bande le « **gâteau** », mélange de matériel souillé par les **fientes** et la nourriture gaspillée par les animaux. La récolte du **gâteau** s'effectue grâce à un outil spécialement conçu à cet effet, qui sépare la litière sèche (fines particules) de la litière humide

agrégée en blocs (le **gâteau**) et laisse retomber la litière sèche au sol. L'ajout de litière fraîche permet ensuite de compenser le volume enlevé lors du **décomprimage** (Sistani *et al.*, 2003).

Demande Chimique en Dioxygène (DCO) :

« La demande chimique en oxygène correspond à la quantité d'oxygène consommé par les matières oxydables par le bichromate de potassium à chaud et en milieu acide dans un litre de solution. Elle est représentative de la majeure partie des composés organiques ainsi que des sels minéraux oxydables.

Elle donne une idée de la charge globale de pollution. Il convient toutefois de rester prudent quant à son interprétation car certains composés ne sont pas oxydés lors de l'essai normalisé (hydrocarbures paraffiniques et cycloparaffiniques, sels ammoniacaux, urée par exemple...) » (Drire HN, 2003).

Densité :

« Rapport de la masse d'un gaz à la masse d'air qui occupe le même volume à même température et même pression » (Larousse, 2009).

Densité particulaire (ρ_p) :

La **densité particulaire** (ρ_p) est le ratio de la masse des particules par le volume individuel des particules (Qiu et Guo, 2010).

Densité volumique (ρ_b) ou densité apparente :

La **densité apparente** d'un charbon actif est calculée de la façon suivante :

$$\rho_b, \text{ g/cm}^3 = m / (v(1 + \theta))$$

où m est la masse d'air sec du charbon actif (g), v est le volume que le charbon occupe dans le cylindre (cm^3), et θ est le taux d'humidité de l'échantillon (%). Cette **densité** tient compte du volume d'air interstitiel (Qiu et Guo, 2010).

Désorption :

« Phénomène consistant, pour un solide, à abandonner les gaz qu'il a absorbés ou adsorbés » (Larousse, 2009).

Dévolatilisation :

« Au cours du traitement thermique (...) réalisé dans un four (**carbonisation**), les composés organiques perdent des matières volatiles, d'abord de l'eau et du dioxyde de **carbone**, des hydrocarbures liquides puis gazeux, ensuite du monoxyde de **carbone** et enfin de l'hydrogène. Ce processus s'appelle la **dévolatilisation**. La température de **dévolatilisation** et l'amplitude du phénomène dépendent du composé organique de départ. Ainsi, pour des charbons de rang croissant, la **dévolatilisation** se produit à température de plus en plus élevée » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Digestion anaérobie :

Voir **biométhanisation**.

Disponibilité (pour un nutriment) :

Voir **biodisponibilité**.

Dureté :

« Degré de résistance d'un matériau à la pénétration par un autre matériau » (Larousse, 2009).

Eau retenue par les parois :

La méthode consiste à mesurer l'**eau retenue par les parois** végétales isolées soumises à la force gravitationnelle. Les parois végétales sont isolées selon la méthode de Carré et Brillouet (1989), l'étape de séchage final à 104 °C étant éliminée. Les parois isolées et humidifiées sont déposées sur un filtre de toile de nylon de 5 µm de taille de maille, rincées par de l'eau distillée sous filtration passive et laissées sous filtration passive pendant 1 min. L'eau adhérente au dessous de la toile est éliminée par 4 dépositions successives de la toile sur une surface lisse en verre. La teneur en eau du résidu pariétal humide est ensuite déterminée par séchage à 104 °C pendant 4 heures. La répétabilité de la méthode est de 3 %. La quantité d'**eau retenue par les parois** (Eau PAR, g/kg) est obtenue en multipliant la rétention d'eau pariétale par la teneur en parois végétales (Carré *et al.*, 1994).

Écosystème :

« Système formé par un environnement (biotope) et par l'ensemble des espèces (**biocénose**) qui y vivent, s'y nourrissent et s'y reproduisent » (Larousse, 2009).

Efficacité alimentaire :

Voir **indice de consommation**.

Effluent :

« Se dit d'un fluide qui s'écoule d'une source, qui sort d'un dispositif, d'une installation » (Larousse, 2009).

Énergie massique :

Voir **pouvoir calorifique**.

Enfouissement (du fumier dans le sol) :

« Action d'enfouir (mettre quelque chose en terre) » (Larousse, 2009).

Engrais :

« Produit organique ou minéral incorporé à la terre pour en maintenir ou en accroître la fertilité » (Larousse, 2009).

Entérite :

Inflammation de la muqueuse intestinale (ITAVI, 1997a).

Épandage :

« Action d'épandre avec régularité des **engrais**, des **amendements** ou des pesticides » (Larousse, 2009).

Eutrophisation :

« Enrichissement naturel ou artificiel d'une eau en matières nutritives » (Larousse, 2009).

Excès d'air :

« Situation où la quantité de **comburant** disponible est supérieure à la quantité nécessaire pour oxyder tout le **combustible**. Dns l'industrie, il est parfois nécessaire d'être en **excès d'air** pour être sûr de brûler complètement et rapidement tout le **combustible** » (Groupement français de la Combustion, 2004).

Fermentation :

« Transformation [anaérobie] que subissent certaines matières organiques sous l'action d'enzymes sécrétées par des micro-organismes » (Larousse, 2009).

Fermentescibilité :

« Qualité de ce qui peut entrer en **fermentation** » (Larousse, 2009).

Fertilité résiduelle :

La **fertilité résiduelle** est la fertilité observée un an (ou plusieurs années) après l'arrêt des **engrais** organiques et minéraux (d'après Reddy *et al.*, 2009).

Fiente :

« Excréments des oiseaux et des petits mammifères » (Larousse, 2009).

Fourrage :

Aliment constitué par l'appareil aérien des plantes fourragères, donc riche en fibres, souvent pauvre en énergie et en protéines (Ponter, 2009a).

Fourrage grossier :

Fourrage constitué de fibres longues. L'indice de fibrosité (ou temps de mastication) d'un **fourrage grossier** est élevé (supérieur à 40) (D'après Ponter, 2009b).

Fumier :

« Mélange plus ou moins fermenté de litières et de déjections animales, utilisé comme **amendement** et comme **engrais** organiques » (Larousse, 2009). Le **fumier de volaille** correspond à l'ensemble du matériel qui est enlevé du poulailler lors du **curage** suite au départ des oiseaux (Rankins Jr *et al.*, 2002).

Fumier solide :

Le **fumier de volaille** solide correspond à une litière profonde, plus riche en matériaux ligno-cellulosiques, ammonium et avec un taux d'humidité plus important (Georgakakis et Krintas, 2000 dans Guerra-Rodríguez *et al.*, 2001).

Gâteau :

C'est un mélange de matériel souillé par les excréments et de nourriture gaspillée par les animaux (Sistani *et al.*, 2003).

Gazéification :

« Transformation thermique d'un solide **combustibles** (charbon, **tourbe**, bois...) en présence d'un composé gazeux (O₂, air, CO₂, vapeur d'eau...). Le but de la **gazéification** est généralement de convertir le solide en vue de l'obtention d'un mélange gazeux **combustible**. Elle se distingue donc

de la **pyrolyse**, opération thermique s'effectuant en l'absence de gaz réagissant avec un solide, et de la **combustion** dans laquelle la plus grande partie du **carbone** contenu dans le solide est transformée en CO₂ » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Granulation :

« Le procédé de **granulation** consiste globalement en une extrusion dans laquelle la **biomasse** préalablement broyée est pressée à l'aide de rouleaux sur la paroi intérieure d'une matrice cylindrique perforée. À la fin de ce procédé, la **biomasse** est sectionnée à une longueur fixe à l'aide de couteaux » (Brodeur *et al.*, 2008).

Granule ou granulé :

« Petit grain d'une matière quelconque » (Larousse, 2009).

Hersage :

« Travail de la couche superficielle du sol réalisé avec la herse et consistant à briser les mottes et à égaliser la surface » (Larousse, 2009).

Hétérotrophe :

« Qui utilise pour se nourrir les matières organiques constituant ou ayant constitué d'autres organismes. (Toutes les espèces vivantes sont **hétérotrophes**, sauf les végétaux chlorophylliens [plantes vertes, algues], qui sont phototrophes, et quelques bactéries, chimiotrophes.) » (Larousse, 2009).

Horizon :

« Couche du sol plus ou moins épaisse et sensiblement parallèle à la surface. L'ensemble des **horizons** d'un sol, ou profil du sol, résulte des transformations d'une même roche mère [**horizon C**] par simple altération [**horizon B**], incorporation de **matière organique** [litière végétale L et **horizons** humifères A_{0a1}], appauvrissement [**horizons** éluviaux A₂ et E] ou, au contraire, par accumulation d'argiles, d'hydroxydes et de complexes organominéraux [**horizons** illuviaux B]. Les **horizons**, caractérisés par leur aspect morphologique, leur nature physico-chimique et minéralogique, et leurs relations réciproques, servent de fondement à la classification et au diagnostic agronomique des sols » (Larousse, 2009).

Humidité absolue ou hygrométrie absolue :

« Nombre de grammes de vapeur d'eau dans un mètre cube d'air » (Larousse, 2009).

Humidité relative ou hygrométrie relative :

« Rapport, en pourcents, de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale (saturante) » (Larousse, 2009).

Hygiénisation :

Selon le CSHPF, l'**hygiénisation** vise à réduire à des taux acceptables les concentrations en agents pathogènes présents dans les boues (bactéries, virus, parasites) (Noël *et al.*, 2002).

Incinération :

C'est l' « action de réduire un solide ou un liquide à ses seuls composés non volatils (cendres) par la **combustion**. (...) Outre les résidus solides, l'**incinération** des déchets produit des gaz de

combustion polluants : oxydes de soufre et d'**azote**, composés halogénés, hydrocarbures...» (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Indice d'aire des feuilles ou **indice d'aire foliaire** :

Cette mesure est faite en mesurant l'interception de la lumière par la canopée d'un végétal (Pratt et Tewolde, 2009).

Indice d'écoulement :

L'**indice d'écoulement** caractérise les propriétés d'écoulement d'un matériel. (McGlinchey, 2005 dans Bernhart et Fasina, 2009).

Indice de consommation :

« Rapport entre la quantité d'aliments consommée par un animal d'élevage au cours d'une période déterminée et le gain de poids vif réalisé pendant la même période » (Larousse, 2009).

Indice de germination :

Il est calculé en faisant un test de germination : on place des graines sur un support donné (par exemple, boîtes de Pétri avec du **fumier** de **volaille**), pendant un temps donné (24 h) et dans des conditions définies (incubateur à 27 °C). À la fin de l'incubation, le nombre de graines germées et la longueur des racines sont évalués. On calcule ainsi un **Indice de Germination** (IG) (Soudi, 2005).

Indice lésionnel :

Pour les coccidies, Johnson et Reid en 1970 ont établi une technique de notation des lésions pour chacune des cinq espèces d'*Eimeria* susceptibles de causer des lésions (Répérant *et al.*, 2007).

Infectivité :

« Pouvoir infectieux d'un agent pathogène » (Larousse, 2009).

Labour :

« Retournement de la terre à l'aide de la bêche, de la houe, de l'araire ou de la charrue, pour l'ameublir, enfouir ce qu'elle porte en surface, et préparer ainsi son futur ensemencement » (Larousse, 2009).

Labour pailis : « **mulch till** » en anglais

Ce système consiste à incorporer les résidus des cultures précédentes dans la terre au cours du **labour** (Endale *et al.*, 2002).

Lessivage :

« Migration d'argile ou de limon dans les sols, aboutissant à la différenciation d'un **horizon** d'accumulation plus argileux que la roche mère et que les **horizons** supérieurs » (Larousse, 2009).

Lit fixe :

« Couche d'un matériau sous forme de particules qui reste stationnaire quand le fluide passe à travers elle » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Lit fluidisé ou lit fluidifié :

« Un **lit fluidisé** est constitué d'un ensemble de particules solides traversé de bas en haut par un fluide dont le débit est tel que le frottement du fluide sur les grains équilibre leur poids » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Lixiviation :

« Entraînement des sels solubles par l'eau qui circule dans le sol de haut en bas. Dissolution chimique de certains constituants d'un matériau, utilisée pour extraire d'un minerai, les métaux, les minéraux de valeur. (Elle peut se faire sur le minerai extrait ou *in situ*.) » (Larousse, 2009).

Luvisol :

Un **luvisol** (...) est un « sol lessivé » de la classification française des sols de 1967. Il est caractérisé du haut en bas par (Jamagne, 1973) :

- un **horizon A** de surface (labouré, ou humifère sous forêt),
- un **horizon E**, plus ou moins blanchi et appauvri en argile,
- un **horizon B**, plus sombre, riche en argile,
- un **horizon C** quelconque, dont la teneur en argile est normalement comprise entre celle du E et celle du B.

Matière organique :

« Dans les sols, ensemble de composés cellulose, de lignine et (en plus faible quantité) de protéines d'origine essentiellement végétale fourni par les litières de feuilles et rameaux et par les racines (ou litières racinaires). [Une partie donne naissance à l'humus, à la suite de transformations complexes.] » (Larousse, 2009).

Métaux lourds :

Voir **Éléments Traces** (ET), Annexe 5.

Most Probable Number (MPN) = nombre le plus probable :

C'est une unité utilisée pour dénombrer les coliformes totaux, *E. coli*, et les entérocoques fécaux, avec des méthodes semi-automatisées (ColilertND et EnterolertND) (Jenkins *et al.*, 2006).

Nombre d'iode :

C'est la quantité d'iode absorbée (mg) par gramme de charbon actif. C'est un indicateur relatif de la **porosité** des charbons actifs. Un **nombre d'iode** élevé suggère une grande **porosité** et une **surface spécifique** élevée (Qiu et Guo, 2010).

Normalité : (pour une solution)

« Rapport de la concentration d'une solution titrée à celle de la solution normale du même corps dissous. (La **normalité** d'une solution normale est égale à l'unité) » (Larousse, 2009).

Nutriment :

« Substance organique ou minérale, directement assimilable sans avoir à subir les processus de dégradation de la digestion » (Larousse, 2009).

Parcours libre :

« Parcelle en herbe pour l'élevage des **volailles** » (Larousse, 2009).

Pénétrromètre :

« Appareil qui mesure la **dureté** d'un bitume, d'un sol, etc., par l'essai de pénétration » (Larousse, 2009).

Picage :

« Habitude vicieuse de certains oiseaux, caractérisée par le becquetage et l'arrachement des plumes de leurs congénères » (Larousse, 2009).

Pile à aération forcée :

Le **compostage** en pile statique à aération forcée comprend l'injection (positive) et/ou l'extraction (négative) d'air à travers une pile de **compost** de forme trapézoïdale. L'agitation a lieu seulement lorsque les piles sont combinées ou lorsque celles-ci sont déplacées dans un endroit différent pour la phase de mûrissement. Afin de mieux gérer les odeurs, les piles sont souvent recouvertes d'une couche de **compost** fini ou de copeaux de bois, qui est ensuite incorporée à l'ensemble du tas lorsque les piles sont déplacées.

Dans le cas des **biosolides**, un agent structurant doit être ajouté pour rendre la pile plus poreuse et permettre d'améliorer la circulation de l'air et le contrôle des températures. Les copeaux de bois sont considérés comme étant le meilleur agent structurant, lesquels sont récupérés grâce à un système de tamisage et réintroduits dans le mélange initial de la pile. Un des avantages du **compostage** en pile statique à aération forcée est la possibilité de récupérer l'air du procédé pour traiter les odeurs (habituellement à l'aide d'un biofiltre).

(Conseil Canadien du Compostage, 2009)

Phytostabilisation :

La **phytostabilisation** est le recours à des plantes vasculaires pour réduire la mobilité et diffusion des polluants contenus dans un sol dans l'environnement : que ce soit sous forme de poussières, d'ions ou particules lessivés par l'eau, ou transportés par la faune (bioturbation), ces trois modes de transports de polluants étant généralement les premières causes de recontamination de l'environnement sur et autour des sites pollués. La **phytostabilisation** ne traite donc pas véritablement la pollution ; elle est seulement fixée (Wikipédia, 2009).

Porosité :

« Structure lacunaire des corps solides qui comportent de nombreux pores dont les dimensions sont grandes par rapport aux atomes, mais petites à l'échelle de nos observations ordinaires.

Rapport du volume des pores d'un corps au volume occupé par ce corps » (Larousse, 2009).

Potentiel de réchauffement global :

« Indice, décrivant les caractéristiques de radiation de gaz à effet de serre bien mélangés, représentant l'effet combiné de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère et leur efficacité relative pour absorber le **rayonnement** infrarouge sortant. Cet indice donne l'approximation de l'effet de réchauffement dans le temps d'une masse unitaire d'un gaz à effet de serre donné dans l'atmosphère, par rapport à celui du dioxyde de **carbone** » (GIEC, 2001).

Pouvoir calorifique inférieur ou pouvoir calorifique utile ou pouvoir calorifique net :

« Quantité de chaleur dégagée par la **combustion** d'un gaz ou d'un **combustible** liquide, compte tenu des calories absorbées par la vaporisation de l'eau formée. (Le **pouvoir calorifique inférieur** de l'essence est de 43 900 kilojoules par kg) » (Larousse, 2009).

Pouvoir Calorifique supérieur ou chaleur de combustion ou Energie massique :

Le **pouvoir calorifique supérieur** (PCS) est défini comme l'enthalpie de la **combustion** complète, avec, par exemple, tout le **carbone** transformé en CO₂ et tout l'hydrogène transformé en H₂O liquide, sous des conditions standards (pression atmosphérique de 101,3 kPa et température ambiante de 25 °C) (Friedl *et al.*, 2005).

Pouvoir collant (des excréta) :

Le **pouvoir collant** ou propriété collante des excréta est déterminé à l'aide d'un rhéomètre digital conçu pour caractériser les matériaux pâteux. L'appareillage consiste en un palpeur mobile cylindrique actionné par un moteur pas à pas et contrôlé par un capteur de force de 50 N à 0,1 N. L'échantillon de **fiente** homogénéisé est placé dans une coupelle et compressé par le palpeur à une vitesse de 7,5 mm/min jusqu'à ce que la force de compression atteigne 12 N. À ce point, le palpeur est arrêté puis actionné en traction à la même vitesse, avec mesure en continu de la force de traction. La force maximum de traction (N) est enregistrée et présentée comme le **pouvoir collant** de l'échantillon (Carré *et al.*, 1994).

Pratiques aratoires anti-érosives :

Ce sont les pratiques de **labour** ou de plantation qui laissent 30 % ou plus des résidus de récolte à la surface du sol après la plantation (CTIC, 1998 dans Endale *et al.*, 2002). Elles comprennent le système sans **labour** ou **labour paillis**, avec la **culture de couverture** de seigle en hiver. Elles aboutissent à un changement des propriétés physiques et chimiques du sol, ce qui affecte la croissance des cultures et l'environnement.

Pyrolyse (« pyrolysis » en anglais) :

C'est la « décomposition chimique irréversible, provoquée par une simple élévation de température en l'absence de dioxygène. Ce phénomène est aussi appelé décomposition thermique » (Groupement Français de la Combustion, 2004).

Rayonnement :

« Transport d'énergie sous forme d'ondes ou de particules à partir d'une source ; ondes ou particules assurant un transport d'énergie dans un milieu » (Larousse, 2009).

Réacteur à lit de boues expansées :

C'est un lit constitué par une couche de boue **granulée** très concentrée. La production de biogaz et l'afflux ascendant sont responsables de l'expansion. (Alpha UT, 2009).

Rendement :

« Poids, volume d'une récolte rapporté à l'unité de surface, souvent exprimé en quintaux ou en tonnes par hectare » (Larousse, 2009).

Ruissellement :

« Écoulement instantané et temporaire, diffus ou concentré, des eaux sur un versant à la suite d'une averse (ou de la fusion nivale) » (Larousse, 2009).

Scarifiage :

« Travail du sol avec des outils à dents » (Larousse, 2009).

Sentinelle :

C'est un être vivant placé dans un environnement particulier pour détecter la présence d'un agent infectieux ou toxique, par exemple (d'après Maurer *et al.*, 2009).

Solides Totaux :

Matière sèche d'un composé (McGahan *et al.*, 2008)

Solides Totaux Dissous :

Sels inorganiques (ions en quantité importante) et **matière organique/nutriments** dissous dans l'eau, utilisée comme une mesure de la **salinité** (McGahan *et al.*, 2008).

Solides Volatils :

C'est la quantité de **solides totaux** brûlés ou évacués quand un matériau est chauffé à 600 °C pendant une heure. Les **Solides Volatils** sont une mesure du taux de solides organiques biodégradables d'un matériau (McGahan *et al.*, 2008).

Sorption :

La **sorption** est l'action d'absorber, d'adsorber ou de désorber. Elle résulte de l'action de molécules de gaz ou de liquide mis en contact avec un matériau solide, et qui adhèrent à sa surface. L'**adsorption** est la fixation de ces molécules de gaz ou de liquide à la surface, alors que l'absorption est la fixation et la transformation chimique de ces molécules : dans les deux cas, la molécule fixée n'est plus présente dans le solvant.

Enfin, la **désorption** est la transformation inverse de l'**adsorption**, par laquelle les molécules adsorbées se détachent du **substrat**. (Wikipédia, 2009)

Spéciation :

En chimie, la **spéciation** désigne l'ensemble des espèces chimiques sous lesquelles un élément se présente dans un environnement donné (Wikipédia, 2009).

Substrat :

En chimie, c'est « celui des deux partenaires d'une réaction chimique dont on examine les changements structuraux » (Larousse, 2009).

Superphosphate :

« **Engrais** minéral simple phosphaté obtenu à partir de phosphate » (Larousse, 2009). Il est utilisé comme **amendement supprimeur d'ammoniac** utilisé sur la litière en présence ou non des animaux.

Suppresseurs d'ammoniac :

Le contrôle chimique de la production d'ammoniac s'effectue par une inhibition de la croissance des micro-organismes qui décomposent l'acide urique ou par neutralisation de l'ammoniac relâché. Maintenir la litière à un pH faible de 6 (dans le cas des produits acidifiants comme l'alun, le sulfate d'aluminium, le mélange acide sulfurique/argile) inhibe la croissance des bactéries uricolytiques et augmente cette capacité de maintenir l'ammoniac à une faible concentration dans le bâtiment.

Le **superphosphate**, l'acide phosphorique et le **bisulfate de sodium** (PLTND) sont les **suppresseurs d'ammoniac** les plus utilisés en pratique. La chaux, agent alcalin, a un effet bactéricide et bloque par son pH de 9 à 11 la **fermentation** (ITAVI, 1997b).

Surface spécifique :

La **surface spécifique** désigne la superficie réelle de la surface d'un objet par opposition à sa surface apparente. Cela a une grande importance pour les phénomènes faisant intervenir les surfaces, comme l'**adsorption** ou les échanges de chaleur. On l'exprime en général en surface par unité de masse, en mètre carré par kilogramme (m²/kg), ou en une des unités dérivées (par exemple mètre carré par gramme, 1 m²/g). On parle de ce fait parfois d'aire massique. (Wikipédia, 2009)

Taux de cisaillement :

Vitesse de déformation par cisaillement. Il est exprimé en s⁻¹ (d'après Kim *et al.*, 2009).

Température axiale : (chambre de combustion)

Dans une chambre de **combustion à lit fluidisé**, c'est la température mesurée le long des parois intérieures de la chambre de **combustion**, en prenant le plateau de distribution comme hauteur h= 0. (Zhu et Lee, 2005).

Température critique inférieure :

« La **température critique inférieure** est la température à partir de laquelle l'animal doit augmenter sa thermogénèse pour compenser un accroissement de la thermolyse sensible » (Gayraud, 2009).

Température radiale (chambre de combustion) :

Dans une chambre de **combustion à lit fluidisé**, c'est la température mesurée dans le **tirant d'air**, à la hauteur de l'introduction de l'**air secondaire**, à partir du centre de la chambre de **combustion** vers les parois de celle-ci (Zhu et Lee, 2005).

Temps de séjour hydraulique :

Il « correspond à la durée théorique du contact entre l'**effluent** et la **biomasse**. Il représente le rapport entre le volume du réacteur et le débit d'alimentation » (Méthanisation.info, 2009).

Tirant d'air (chambre de combustion) :

« Plus grand encombrement en hauteur d'un bâtiment » (Larousse, 2009).

Tourbe :

« Sol hydromorphe à nappe phréatique permanente, à accumulation de **matière organique** incomplètement décomposée, provenant des débris végétaux et racines des plantes hygrophiles (surtout les sphaignes). [Fossile ou actuelle, la **tourbe** fournit, après séchage, un **combustible** médiocre.] » (Larousse, 2009).

Tuyère :

« Pièce tubulaire refroidie permettant de souffler (...) de l'oxygène dans un convertisseur (dispositif assurant une conversion ou un transfert d'énergie et dans lequel une énergie au moins est de nature électrique) à soufflage par le fond » (Larousse, 2009).

Ultisol :

Ce sont des sols minéraux qui ne contiennent pas de calcaire, qui ont moins de 10 % de minéraux altérables dans leur couche supérieure, et qui ont moins de 35 % de saturation en cations à travers le sol (Wikipédia, 2009).

Unité Nutritive Totale (UNT) = Total Digestive Nutrient :

« Nombre d'animaux présents à un moment donné dans une unité agricole, en stabulation ou au pré, qui produisent la quantité de **fumier** permettant de fertiliser la même superficie de terres **labourables** compte tenu du facteur le plus limitant (**azote** ou **phosphore**), calculé à l'aide d'un logiciel sur la gestion des éléments nutritifs » (Omafra, 2002).

Unité phytase :

Une unité phytase correspond au nombre de micromoles de phosphore libéré/min/mL du jus fermenté dans les conditions de la fermentation (Hassouni *et al.*, 2007).

Unité Taxonomique Opérationnelle (OTU) :

C'est un taxon de bactéries phylogénétiquement proches. Le regroupement des bactéries est fait en comparant leurs ARNr 16S et leurs phospholipides (d'après Jangid *et al.*, 2008).

Uricémie :

Taux d'acide urique dans le sang (ITAVI, 1997a).

Viscosité (dynamique) :

C'est le « coefficient caractéristique d'un fluide, égal à la force nécessaire au déplacement de l'unité de surface plane du fluide, avec une vitesse unité, par rapport à une autre surface plane du même fluide qui lui est parallèle à une distance unité. (Unité du système international [SI] : le pascal-seconde) » (Larousse, 2009).

Volaille :

Oiseau élevé dans une basse-cour ou selon les techniques de l'aviculture.

Ensemble des oiseaux d'une basse-cour, et particulièrement de gallinacés» (Larousse, 2009).

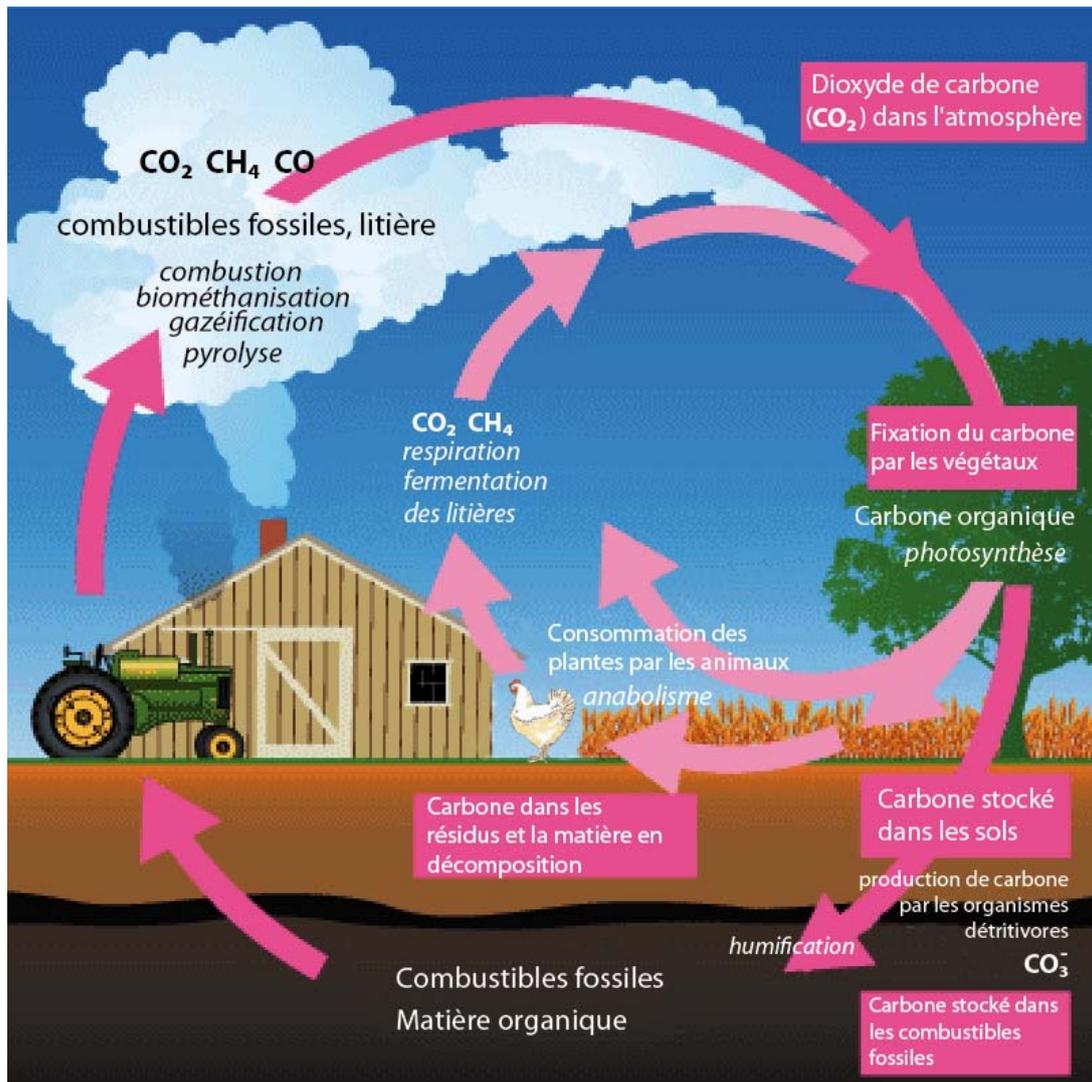
En France, une définition légale est « tout oiseau élevé ou détenu en captivité à des fins de reproduction, de production de viande, d'oeufs de consommation ou de tout autre produit et de repeuplement de population de gibier à plumes » (définition de l'Arrêté du 29 octobre 2007 fixant des mesures techniques et administratives relatives à la lutte contre l'influenza aviaire, NOR: AGRG0769497A, parue au JO du 9 novembre 2007).

Zéolithe :

« Nom donné à un groupe d'aluminosilicates naturels hydratés des métaux alcalins ou alcalinoterreux » (Larousse, 2009).

ANNEXE 2 : Le cycle du carbone

Figure 10 : cycle du carbone et élevage de volailles. D'après Farming Futures, 2010.



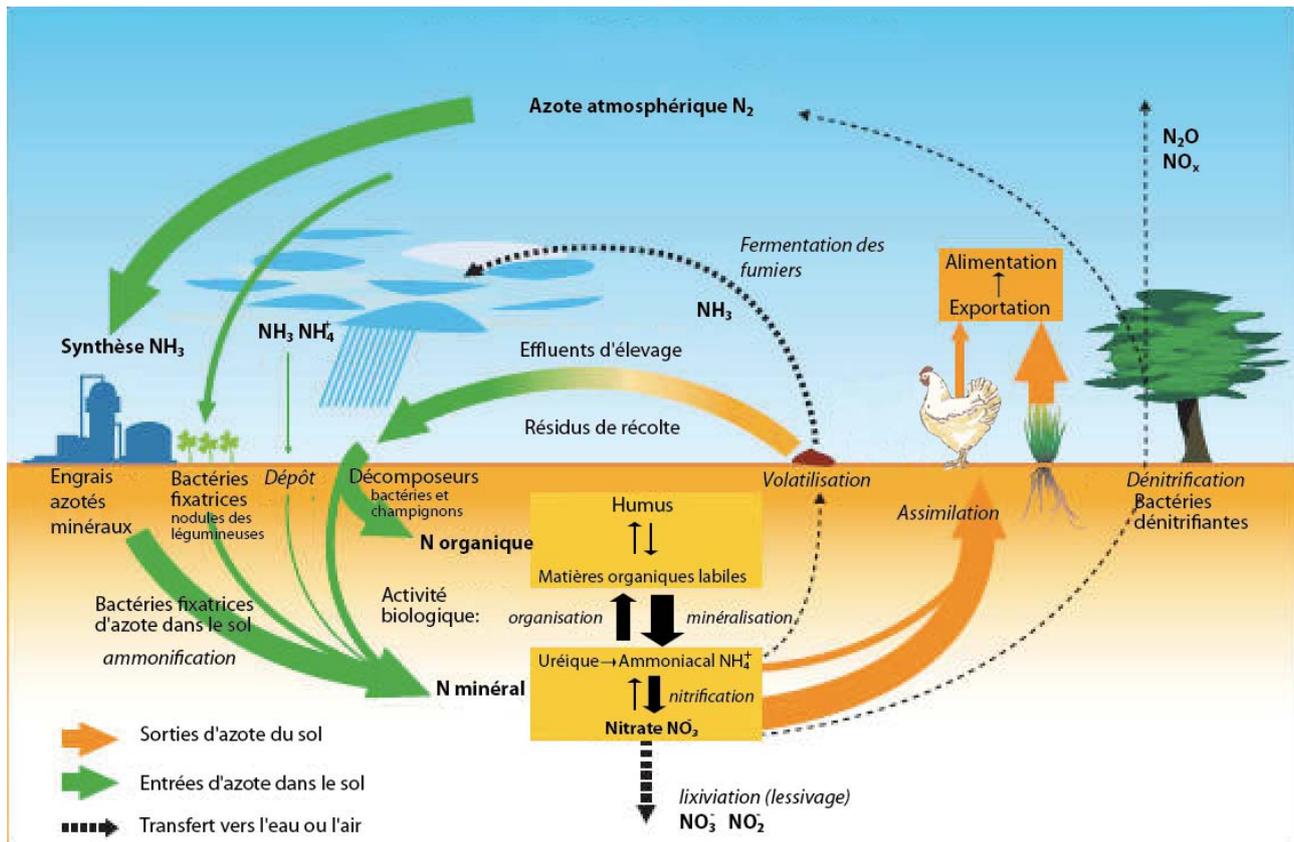
Composé Organique Volatile :

Les composés organiques volatils, ou COV sont des hydrocarbures dont la pression de vapeur est au moins égale à $P_v \geq 0,01$ kPa à une température de 293,15 K (pouvant facilement se trouver en sous forme gazeuse dans l'atmosphère). Ils peuvent être d'origine anthropique (raffinage, évaporations de solvants, imbrûlés...) ou naturelle (émissions par les plantes).

Les COV sont précurseurs, avec les oxydes d'azote, de l'ozone troposphérique. Ce sont donc des gaz à effet de serre. Leur caractère volatile leur permet de se propager plus ou moins loin de leur lieu d'émission. Ils peuvent donc avoir des impacts directs et indirects. (Bernard *et al.*, 2010)

ANNEXE 3 : Le cycle de l'azote

Figure 11 : cycle de l'azote et élevage de volailles. D'après Azote.info, 2009.



L'ammoniac existe sous forme gazeuse (NH_3) ou dans un état ionisé (NH_4^+), qui est hydrosoluble. Le NH_3 gazeux peut être perdu dans l'atmosphère alors que le NH_4^+ est transformé en nitrates par les microorganismes (**nitrification**). Le nitrate est hydrosoluble et peut être présent dans les eaux de **ruissellement** (Kelleher *et al.*, 2002).

Ammoniac total :

Il comprend l'ammonium (NH_4^+) et l'ammoniac (NH_3) (Dong et Tollner, 2003).

Azote Kjeldahl :

C'est l'**azote** dosé suivant la méthode de Kjeldahl : « méthode d'analyse chimique inventée en 1883 par le chimiste danois J. G. Kjeldahl (1849-1900) pour doser l'**azote** des composés organiques » (Larousse, 2009).

C'est la somme de l'**azote** organique et ammoniacal (à l'exclusion des nitrates et des nitrites) (Calandre et Janoco, 2006).

L'**azote** Kjeldahl est mesuré par la méthode automatisée au salicylate-nitroprusside (Haggard *et al.*, 2003).

Azote total :

Il correspond à l'**azote Kjeldahl** + les nitrates et les nitrites (Calandre et Janoco, 2006).

Dénitrification :

« Action des bactéries du sol qui appauvrissent celui-ci en nitrates et libèrent de l'**azote** moléculaire. (La **dénitrification** est nuisible à la fertilité des sols.) » (Larousse, 2009).

Minéralisation potentielle nette en azote :

Cette valeur correspond à la production d'**azote** minéral au cours de la minéralisation (Prévosto *et al.*, 2002).

Nitrification :

C'est la « transformation de l'**azote** ammoniacal (ions NH_4^+) de la **matière organique** du sol en **azote** nitrique (ions NO_3^-). » Elle se décompose en deux étapes : la **nitrosation**, ou transformation de l'**azote** ammoniacal en **azote** nitreux (nitrite NO_2^-) puis la nitratisation ou transformation de l'**azote** nitreux en nitrate (NO_3^-) (Larousse, 2009).

Nitrification potentielle nette :

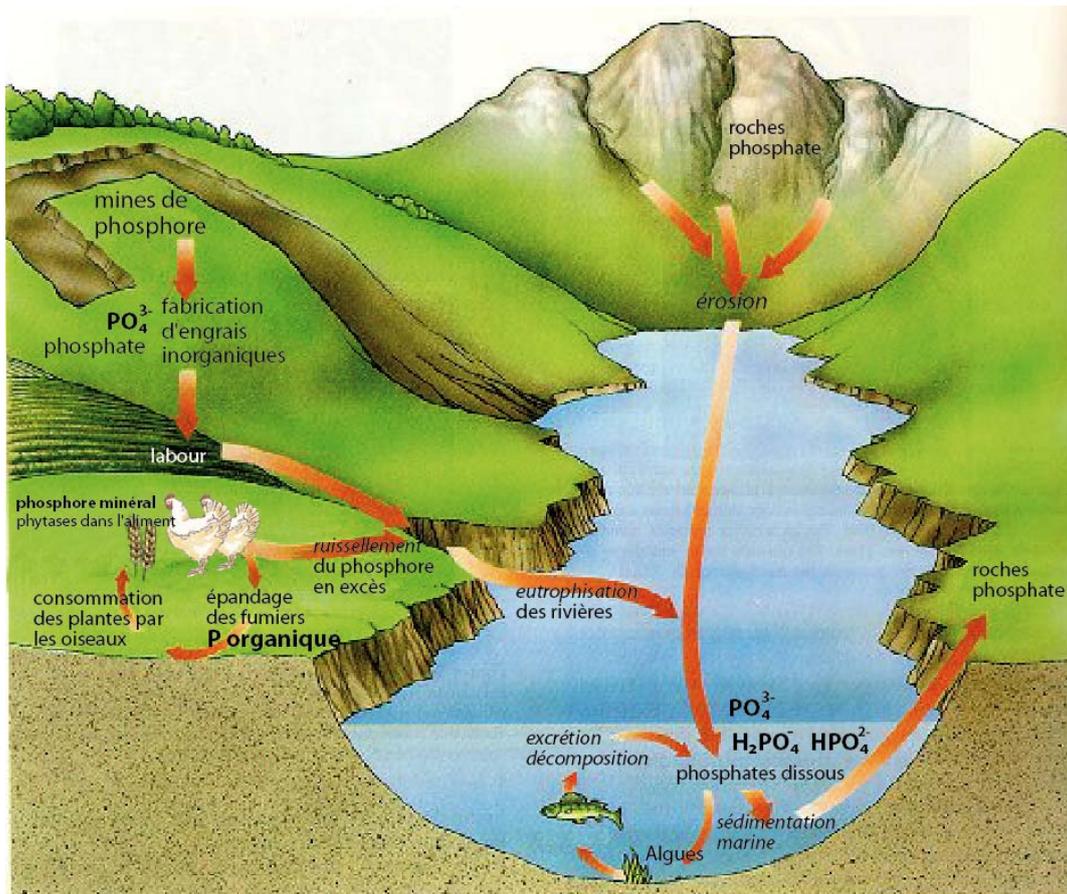
Cette valeur correspond à la production de nitrates au cours de la **nitrification** (Prévosto *et al.*, 2002).

Nitrosation :

« Première phase de la **nitrification**, au cours de laquelle l'**azote** ammoniacal du sol est transformé en **azote** nitreux sous l'effet de bactéries aérobies (*Nitrosomonas*) » (Larousse, 2009).

ANNEXE 4 : Le cycle du phosphore

Figure 12 : cycle du phosphore et élevage de volailles. D'après Ridge, 1995.



Les différentes formes de **phosphore** sont l'orthophosphate, ou **phosphore** réactif, le **phosphore** hydrolysable et le **phosphore** organique. De plus, les formes hydrolysables et organiques peuvent être à l'état soluble ou particulaire (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2007).

Phosphore bioactif :

Il comprend le **phosphore extractible dans l'eau**, le phosphate inorganique échangeable de ligand et le **phosphore** organique clivable par les phosphohydrolases et échangeable de ligand. Pour effectuer les différents dosages, on mélange de la litière en poudre dans l'eau déionisée à 1/100^{ème}. Le phosphate inorganique échangeable de ligand est déterminé par **complexation** avec l'EDTA : l'EDTA est ajoutée à la litière en solution, le mélange est centrifugé, et le phosphate est dosé dans le surnageant. Le **phosphore** organique clivable par les phosphohydrolases et échangeable de ligand est déterminé en ajoutant *Aspergillus ficuum* purifiée au mélange EDTA/litière en solution, centrifugé et le phosphate du surnageant est dosé (Dao et Hoang, 2008).

Phosphore soluble réactif ou phosphore dissous total :

Dans le **phosphore** soluble, on trouve l'orthophosphate libre (H_2PO_4^- et HPO_4^{2-}), élément clé du fait de sa grande **biodisponibilité**. Il est à chaque instant en équilibre dynamique avec l'orthophosphate des composés chimiques solides, cristallins ou amorphes. De ce fait, la concentration en orthophosphate, à un moment donné, dépendra du pH qui agit sur la solubilité des complexes formés et du potentiel redox qui agit sur la valence ionique de certains éléments métalliques (fer, manganèse).

Accompagnant l'orthophosphate libre, on voit également des phosphates condensés, d'origines naturelle ou industrielle, mais ils sont instables.

(Fernandez et Coppens, 1998).

Phosphore extractible dans l'eau :

Il est exprimé en pourcentage. Il correspond à la fraction de **phosphore** la plus facilement assimilable par les végétaux (Payne, 2007).

Phosphore total :

Le **phosphore total** (P_{tot}) est un paramètre cumulatif qui englobe les composés phosphorés organiques et inorganiques. La plus grande partie du **phosphore total** présent dans les eaux usées revêt une forme inorganique dissoute; une petite partie est sous forme organique (dissoute et non dissoute) (OFEV, 2009).

ANNEXE 5 : Les éléments traces

« Les **éléments traces** sont les 80 éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est pour chacun d'entre eux inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs (O ; Si ; Al ; Fe ; Ca ; Na ; K ; Mg ; Ti ; H ; P ; Mn) représentent 99,4 %. Certains **éléments traces** sont des métaux (ETM, anciennement **métaux lourds**) par ex. : Cd, Cr, Zn, Pb, Cu) d'autres sont des non-métaux (As, Se, B).

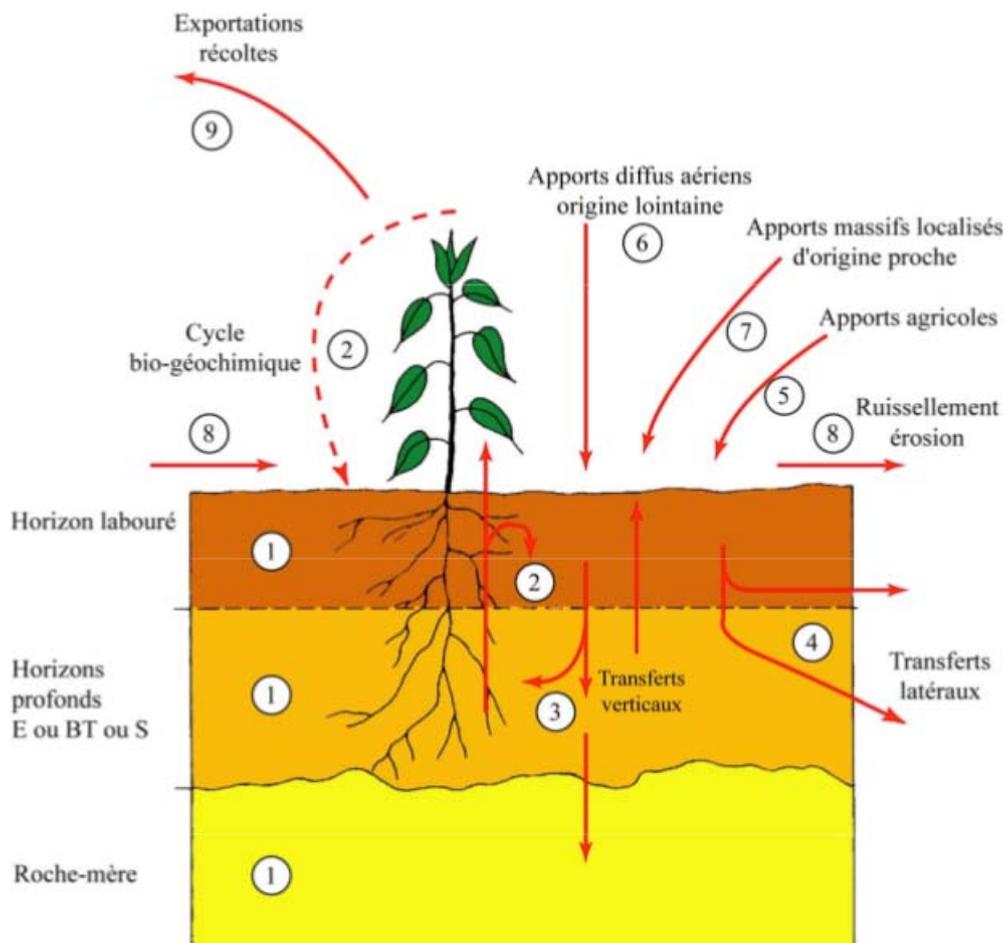
Certains **éléments traces** sont indispensables aux processus biologiques donc à la production agricole végétale et animale : ce sont les **oligo-éléments** (Zn, Cu, Cr, Mo, B). D'autres ne jouent aucun rôle utile : Cd, Pb, Hg, Sn.

Ils sont tous potentiellement polluants. Cela dépendra de leur concentration dans le milieu considéré (sols, air, eau, sédiments) mais surtout de leur forme chimique (**spéciation**) » (Baize, 2006).

Les teneurs mesurées aujourd'hui dans les sols résultent (*figure 13*) :

- de processus naturels : une composition chimique initiale héritée du matériau parental, plus ou moins modifiée ensuite par l'évolution pédogénétique (différenciation d'**horizons**) : le fond pédo-géochimique ;
- d'apports directs ou indirects liés aux activités humaines : les diverses contaminations par des constituants involontaires d'apports gérés à l'échelle de la parcelle agricole (fertilisants, **fumiers**, déjections animales, **boues d'épuration**, **composts** urbains, etc.), par des apports atmosphériques d'origine lointaine (poussières et aérosols provenant des chauffages, activités industrielles, trafic automobile, incinérateurs, etc.), ou par des pollutions localisées massives (souvent à proximité d'une source industrielle).

Figure 13 : schéma de l'acquisition des teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols. Milieux anthropisés. Baize, 2006.



Oligo-élément :

« Quand les **éléments traces** (métalliques ou non) sont indispensables à la vie (par exemple le cuivre, le zinc, le molybdène, le bore, mais aussi le fer, le manganèse), ils sont appelés **oligo-éléments** » (Baize, 2006).

Conductivité électrique :

C'est la mesure de la **salinité**. Les sels présents en grande quantité dans le **fumier** sont les chlorures, les sulfates et les bicarbonates de sodium, potassium, calcium et magnésium. Dans l'eau, ces sels se transforment en ions chargés et la **conductivité électrique** de la solution est proportionnelle à la concentration de ces ions, fournissant ainsi un moyen simple de mesurer la **salinité**. Elle est souvent exprimée en déciSiemens par mètre (dS/m) ou dans son équivalent, le milliSiemens par centimètre (mS/cm) (McGahan *et al.*, 2008).

Mehlich III ou Mehlich-3 :

L'analyse à l'extractif **Mehlich III**, lorsqu'elle est combinée à un spectromètre au plasma (ICP), permet de gagner du temps dans le dosage des minéraux et **oligo-éléments** du sol, puisqu'il est possible d'analyser plusieurs éléments simultanément. Cette méthode est utilisée pour la détermination du **phosphore**, du potassium, du calcium, du magnésium, de l'aluminium, du

manganèse, du cuivre, du zinc et du bore. Elle peut aussi servir pour la détermination du fer, molybdène, plomb, nickel, cobalt et sodium (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'alimentation du Québec, 2003). On désigne un élément X dosé avec la technique à l'extractif **Mehlich** par le sigle **Mehlich-3X** ou **Mehlich III-X**.

Salinité :

Concentration des sels dans une solution (McGahan *et al.*, 2008).

PROPRIETES PHYSIQUES, CHIMIQUES, BIOLOGIQUES ET NUTRITIVES DES LITIERES EN ELEVAGE DE VOLAILLES

NOM et Prénom : BALTAZART Anne

Résumé :

Une litière de qualité doit être isolante, confortable et absorber les fientes des volailles. Elle constitue par ailleurs un substrat important pour le développement comportemental normal des oiseaux. Produite à travers le monde en quantités très importantes, elle peut être à l'origine d'une pollution importante de l'eau et de l'air notamment si son recyclage est mal maîtrisé. Historiquement, la litière a été utilisée pour l'épandage sur les pâtures. D'une part, cette pratique s'est généralisée et est actuellement utilisée pour les cultures en rang (maïs, coton) mais également sur les cultures maraîchères ; d'autre part, elle a généré une pollution importante de l'eau par lessivage et ruissellement des nutriments apportés en excès (phosphore, arsenic) jusqu'à des concentrations parfois toxiques. Le compostage permet de réduire le volume de litière et de faciliter sa manipulation. Il participe à l'assainissement du fumier sans toutefois éliminer complètement les agents pathogènes contrairement à l'application d'une température de 70 °C à cœur pendant 1 h. Le compostage s'accompagne d'émissions gazeuses (ammoniac) très importantes. Il aboutit à une matière organique plus stable, un produit final plus sec et de texture fine, mais dont une grande partie de l'azote a été perdue si aucune précaution n'est prise. La litière peut aussi être utilisée pour la production d'énergie thermique, électrique ou gazeuse. Elle est également utilisée pour la fabrication de charbon actif qui sert à adsorber les métaux lourds et recycler l'eau. Enfin les effluents d'origine avicole peuvent, dans certains pays (Etats-Unis d'Amérique notamment), être incorporés à la ration du bétail, le plus souvent sous forme de suppléments d'urée à libération lente. Cette pratique est cependant très controversée, car la litière contient de nombreux agents pathogènes qui ne sont pas totalement éliminés avant sa distribution aux ruminants.

Mots clés :

LITIERE / FUMIER / VOLAILLES / COMPOST / RECYCLAGE / EPANDAGE / AGENTS PATHOGENES / ALIMENTATION / POLLUTION DE L'AIR / POLLUTION DE L'EAU / AZOTE / AMMONIAC / PHOSPHORE / OLIGO-ELEMENT

Jury :

Président : Pr.

Directeur : Mr. ARNE

Assesseur : Mr. MILLEMANN

Adresse de l'auteur :

Melle BALTAZART Anne

46 rue René Gillet

10800 SAINT JULIEN LES VILLAS

PHYSICAL, CHEMICAL, BIOLOGICAL AND NUTRITIONAL PROPERTIES OF LITTER PRODUCED BY POULTRY FARMING

SURNAME : BALTAZART

First name : Anne

Summary :

The first property of bedding material is to absorb excrements from poultry. In addition, litter is essential in the development of normal behaviour in birds. Very large quantities of litter are produced worldwide and its disposal, when not controlled, can contaminate ground-water and air. Historically litter has been spread on pastures. Although, the spread of poultry litter is very widespread and has been extended to crops grown in rows (corn, cotton) and vegetables, spreading of poultry litter has led to ground-water contamination by leaching and runoff of excess nutrients (phosphorous, arsenic) which can in some cases reach toxic levels (arsenic). Composting can reduce the quantity of poultry litter and make it easier to handle. It can sanitize the litter but it is not as effective as heating to 70°C for 1 hour which kills all pathogens. Composting results in the production of large amounts of gaseous emissions (ammonia). The final product is more stable than raw litter, drier and is fine-textured. However, if precautions are not taken a large proportion of the nitrogen is lost. Poultry litter can produce several forms of energy: heat, electrical or gaseous. It is also used to produce activated carbon which can adsorb heavy metals from water and help in recycling water. Lastly, poultry litter can, in some countries (USA for instance), be fed to cattle, as a slow release urea supplement. The practice of feeding cattle with poultry litter is controversial since litter can contain several pathogens that are still present when fed to cattle.

Keywords :

LITTER / MANURE / POULTRY / COMPOST / RECYCLING / MANURE SPREADING / PATHOGENS / FEEDING / AIR CONTAMINATION / WATER CONTAMINATION / NITROGEN / AMMONIA / PHOSPHORUS / TRACE ELEMENTS

Jury:

President: Pr.

Director: Dr. ARNE

Assessor: Dr. MILLEMANN

Author's address:

Melle BALTAZART Anne

46 rue René Gillet

10800 SAINT JULIEN LES VILLAS