

(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.

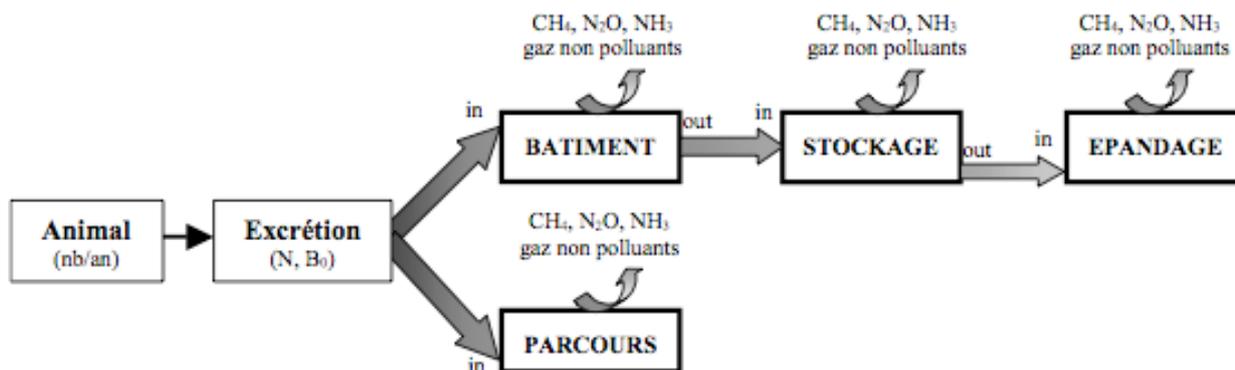
En conclusion, l'application de **fumier de volaille** sur les cultures augmente les émissions de dioxyde de **carbone** du sol. Ce phénomène est aggravé dans les sols compacts. En revanche, si le **fumier** est appliqué sans **labour**, il tend à augmenter la séquestration du **carbone** dans le sol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

[MCours.com](https://www.MCours.com)