

III. LES LITIERES, AMENDEMENTS POUR LES SOLS

MCours.com

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**.

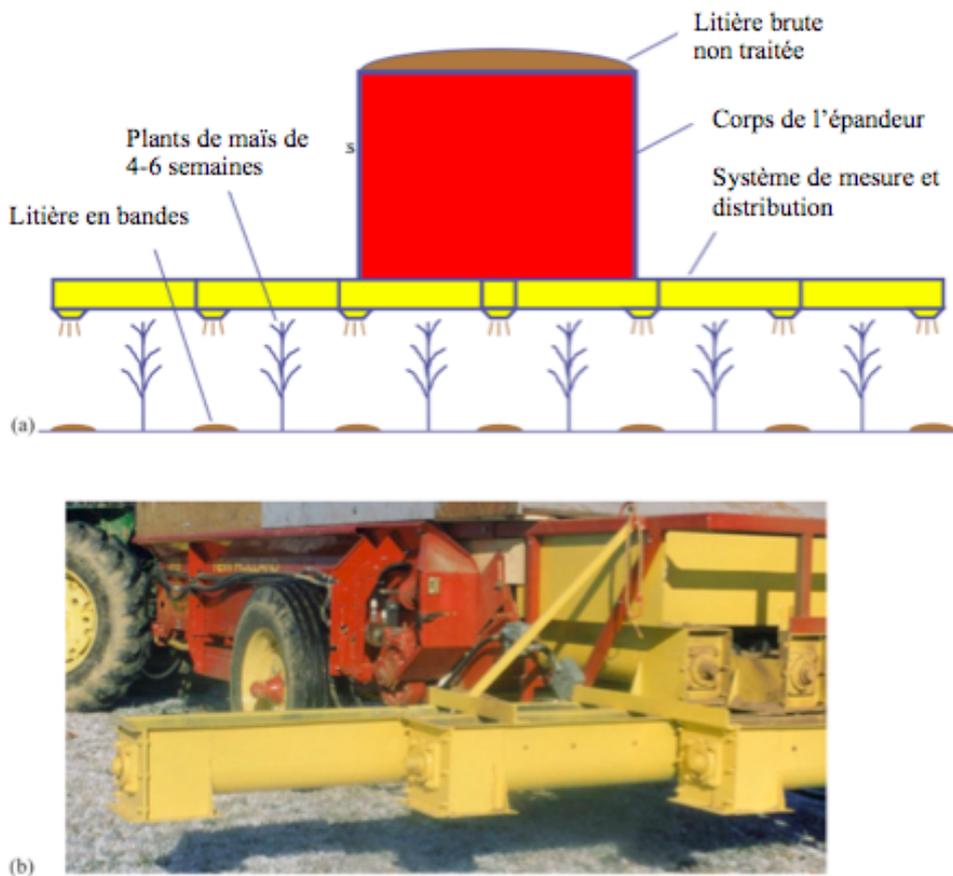
En conclusion, le **fumier** de **volaille** peut être utilisé comme **engrais** pour le coton sans nuire à la production (évaluée par le **rendement** en peluches). La pratique consistant à l'appliquer en considérant que 50 % de l'**azote total** mesuré est disponible pendant la saison de croissance 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/pâturage) 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.