

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

a) Origine des émissions gazeuses

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

b) Fermentation de la litière

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

c) Nature et quantification des émissions gazeuses

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

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

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

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

(1) Ammoniac (NH₃)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(2) Protoxyde d'azote

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

l'**azote** émis sous forme de **diazote** (N₂) considérée comme non polluant. De plus, la valeur donnée par le CORPEN inclut les pertes relatives au stockage.

(3) Sulfure d'hydrogène

Lubac *et al.* (2005) ont quantifié et analysé les teneurs et émissions de gaz comme l'hydrogène sulfuré (H₂S) depuis les élevages de canards de Barbarie (protocole expérimental décrit en (1)). Le débit de H₂S moyen s'élevait à 3 580 mg/h, soit 0,67 mg/h par canard, pour une teneur moyenne en H₂S de 516 ± 638 µg/m³ d'air sur 101 séries de mesures. Les émissions de gaz et d'odeurs les plus élevées ont été mesurées en période plutôt froide en fin de bande des canards. Par rapport au scénario correspondant aux émissions les plus faibles (jeune âge, températures extérieures froides), le débit d'H₂S par canard était multiplié par 5,6.

(4) Nuisances odorantes liées aux émissions gazeuses

Chez les canards de Barbarie, qui sont réputés être à l'origine des plus fortes nuisances en termes d'odeurs de la filière **volaille**, Lubac *et al.* (2005) ont quantifié et analysé les émissions correspondantes (protocole expérimental décrit en (1)). Le niveau moyen d'odeurs relevé sur 26 séries de mesures était de 4 050 u.o., avec un débit d'odeur de 59,3.10⁶ ± 15,3.10⁶ u.o./h soit 11 400 ± 3750 u.o./canard/h. Ce dernier est lié de manière très significative au niveau d'odeurs ainsi qu'aux débits globaux d'air, de NH₃ et de H₂S. Une fois encore les émissions d'odeurs les plus fortes ont été mesurées en période plutôt froide et en fin de phase d'élevage. Par rapport au scénario correspondant aux émissions les plus faibles (jeune âge, températures extérieures froides), le débit d'odeurs était multiplié par 38.

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

D. Gestion de la litière

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

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

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

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

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

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

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

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

1. Traitements chimiques de la litière

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

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

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

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

2. Inoculation des litières avec des flores microbiennes

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

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

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

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

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

E. Modifications des litières : causes

1. Ambiance

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

a) Ventilation

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

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

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

b) Température

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

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

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

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

c) Hygrométrie

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

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

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

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

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

2. Sol

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

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

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

3. Espèce animale et âge

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

4. Litière

a) Nature

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

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

b) Épaisseur

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

c) Humidité

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

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

d) pH

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

5. Densité des animaux

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

6. Type de démarrage

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

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

7. Aménagement et équipement du bâtiment d'élevage

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

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

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

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

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

8. Problèmes pathologiques

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

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

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

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

9. Alimentation

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

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

a) Quantité et qualité des protéines

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

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

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

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

b) Minéraux en excès

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

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

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

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

- Composés arsenicaux (Roxarsone)

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

c) Phosphore et phytases

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

d) Présence de fibres

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

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

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

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

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

e) Matières grasses

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

f) PSNA

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

F. Dégradation des litières : conséquences

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

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

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

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

a) Atteintes respiratoires

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

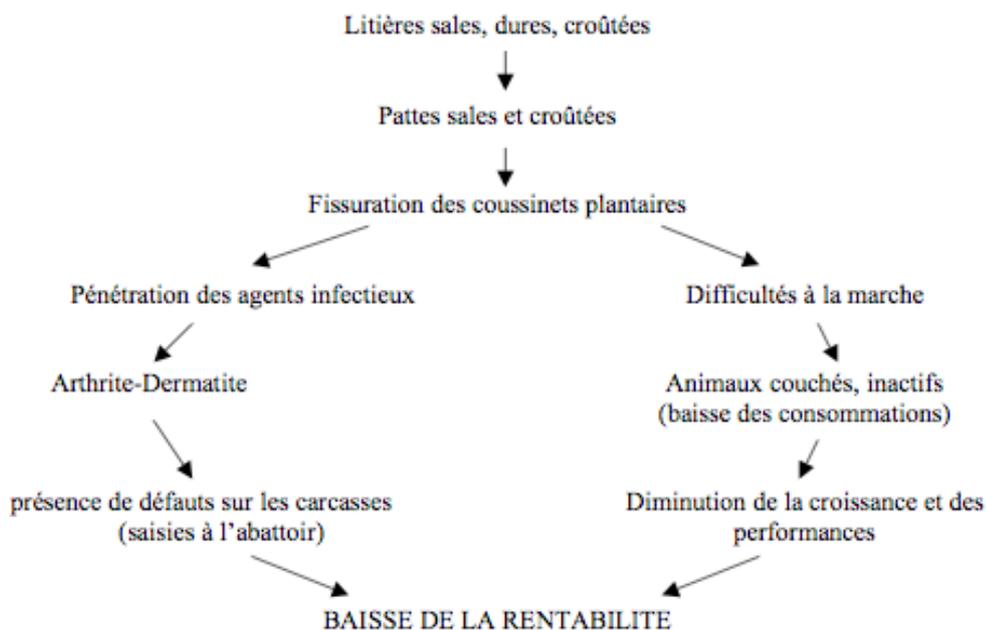
Une forte teneur en ammoniac peut avoir une influence directe sur la santé des animaux. Il s'agit même de la conséquence la plus importante liée à une litière de mauvaise qualité. Or la production de ce gaz est promue par une humidité excessive de la litière, et ce d'autant plus qu'elle est constituée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

b) Atteintes locomotrices

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

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

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



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

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

c) Atteintes oculaires

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

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

G. Composition des fumiers

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Taux d'humidité

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

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

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

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

3. Concentration en macroéléments

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

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

a) Carbone²

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

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

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

b) Azote³

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

² Voir également le Cycle du Carbone en Annexe 2.

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

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

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

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

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

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

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

c) Phosphore⁴

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

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

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

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

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

d) Potassium

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

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

⁴ Voir également le Cycle du Phosphore en Annexe 4.

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

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

e) Hydrogène, oxygène, soufre

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

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

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

4. Concentration en éléments traces⁵

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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