

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

[McCours.com](https://www.mccours.com)

A. La litière, aliment

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

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

a) Caractéristiques de la litière en tant qu'aliment

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

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

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

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

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

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

- Nature du **substrat**

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

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

- Humidité

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

- Unités nutritives totales

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

- Sources azotées

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

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

- Fibres

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

- Minéraux et cendres

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

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

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

b) La litière dans l'alimentation des bovins

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

c) La litière dans l'aliment des petits ruminants

(1) Ovins

- **Disponibilité** du sélénium de la litière

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

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

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

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

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

(2) Caprins

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

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

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

d) La litière dans l'alimentation des porcs

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

2. Acceptation de la viande par le consommateur

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

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

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

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

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

4. Additifs pour la litière (L-carnitine)

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

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

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

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

B. La litière, source d'énergies

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

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

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

1. Calorimétrie de la litière de volaille

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

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

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

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

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

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

Soit pour le groupe 9, les valeurs mesurées étaient :

C = 42,6 %

H = 5,7 %

N = 3,4 %

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Combustion et co-combustion

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

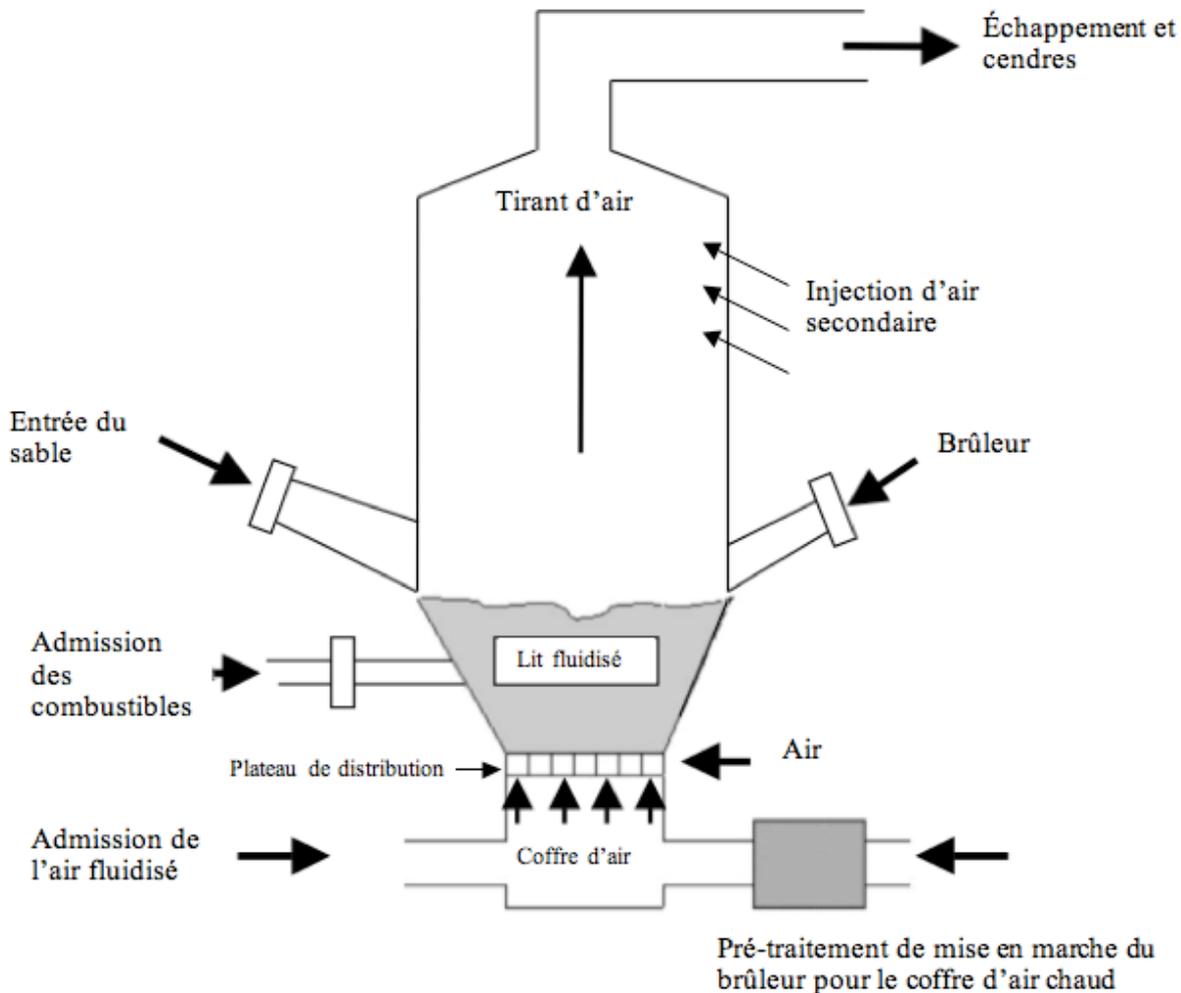
La litière de **volaille** a une température de fusion des cendres basse, ce qui pose problème lors de l'utilisation d'un système de grille de **combustion** conventionnelle (Kelleher *et al.*, 2002). La technologie du **lit fluidisé** a donc été développée pour la construction d'usines électriques utilisant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

a) En chambre de combustion à lit fluidisé

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

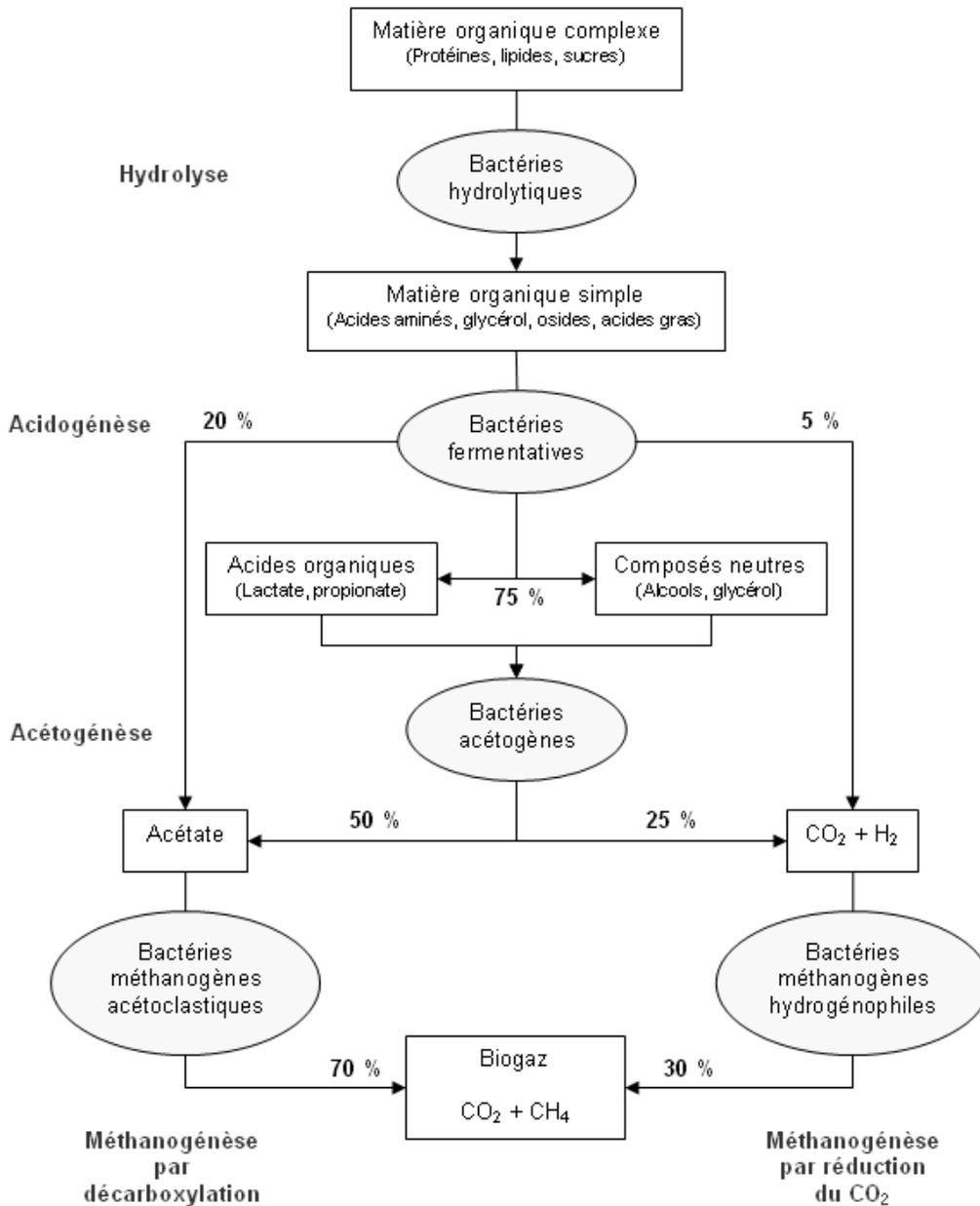
En conclusion, la technologie du **lit fluidisé** permet une **combustion** complète de la litière seule, à condition que le taux d'humidité de cette dernière soit inférieur à 25 %. Au dessus de 25 % d'humidité, la co-combustion avec la **tourbe** est possible. Enfin, l'injection d'**air secondaire**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

3. Biométhanisation, gazéification

a) Biométhanisation

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

b) Gazéification

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

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

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

4. Pyrolyse

a) en chambre de combustion à lit fluidisé

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

b) En chambre de combustion à grille

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

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

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

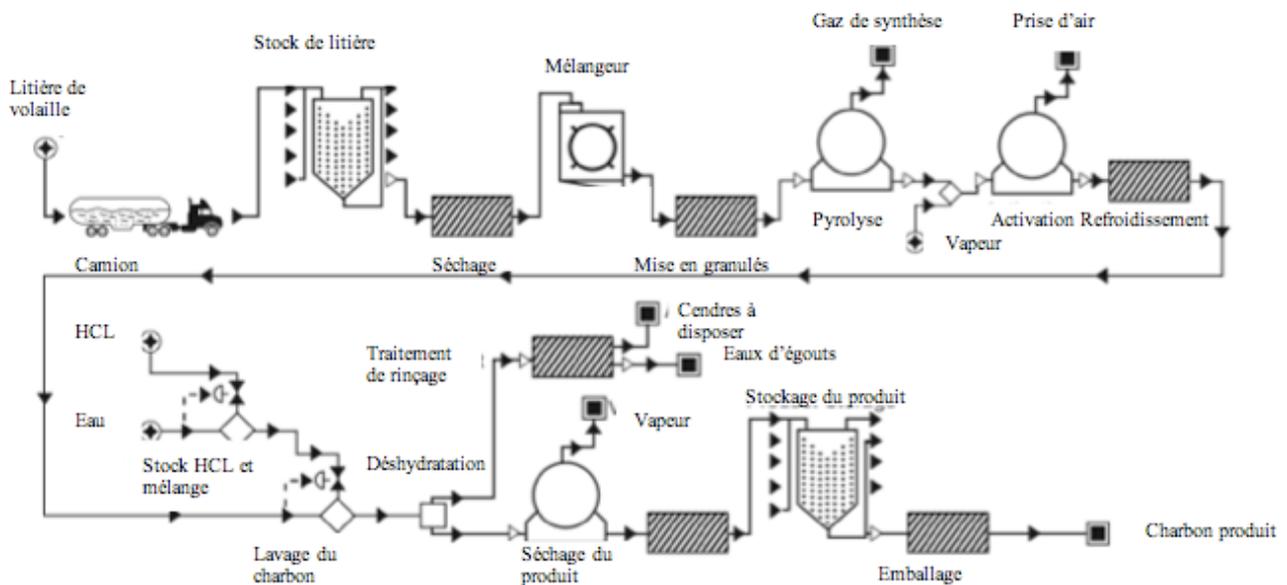
Les résultats suggèrent que, pour les applications de la **combustion**, l'efficacité du contrôle de NO_x pourrait être améliorée quand les **combustibles** de **biomasse** sont co-brûlés avec le charbon, si une **dévolatilisation** complète est assurée dans la zone de forte concentration en **combustible**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

c) Production de charbon activé

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

C. La litière, milieu de culture pour les bactéries

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

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