

Les productions animales dans la bioéconomie

INRA Prod. Anim.,
2019, 32 (2), 205-220

Jean-Yves DOURMAD¹, Thomas GUILBAUD², Muriel TICHIT^{1,3}, Thierry BONAUDO³

¹PEGASE, INRA, AGROCAMPUS OUEST, 35590, Saint-Gilles, France

²CEREOPA, 75231, Paris, France

³SADAPT, INRA, AGROPARISTECH, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France

Courriel : jean-yves.dourmad@inra.fr

■ Le développement d'une économie fondée sur l'utilisation de biomasse issue de la photosynthèse, ou bioéconomie, permettrait de répondre aux enjeux de sécurité alimentaire, de changement climatique et de préservation des ressources naturelles. L'élevage comme élément transformateur et producteur de bioressources est un important moteur de la bioéconomie.

1. Introduction

■ 1.1. La bioéconomie, une réalité ancienne, des enjeux nouveaux

La bioéconomie est la dénomination récente d'une économie fondée sur l'utilisation de biomasse issue de la photosynthèse, plutôt que sur celle des ressources fossiles (Colonna, 2013). En ce sens, il ne s'agit pas vraiment d'une nouveauté puisque jusqu'au milieu du XIX^e siècle la survie de l'humanité a essentiellement reposé sur les produits naturels, forestiers, agricoles et aquatiques, pour l'alimentation humaine et la production de matériaux (Abel et Blanc, 2017). Toutefois, le développement actuel de la bioéconomie se fait dans un contexte complètement différent avec, d'une part, une population mondiale qui a été multipliée par cinq depuis 1850, une utilisation exacerbée des ressources de la planète, accompagné d'atteintes à la biodiversité et au climat et, d'autre part, le développement de biotechnologies innovantes (chimie de l'amidon, synthèse microbienne d'acides aminés, de protéines, d'enzymes...) qui offrent des perspectives nouvelles.

Le Rapport Interministériel (2016) « Une stratégie bioéconomie pour la France » définit la bioéconomie comme « l'ensemble des activités liées à la production de bioressources et leur utilisation ou leur transformation pour répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins en énergie et en matériaux de la société, tout en préservant les ressources naturelles et en garantissant la production de services environnementaux de bonne qualité ». Cette définition est très voisine de celle donnée par la Commission Européenne (CE, 2012 ; CE, 2018) et par le Comité allemand de la bioéconomie (GBC, 2015), lequel englobe dans sa définition aussi bien la bioéconomie qualifiée de « traditionnelle » comme l'agriculture, la forêt, la pêche et l'aquaculture, que les bioindustries de transformation et de service comme l'agroalimentaire, le papier, le textile, la construction, la chimie et la pharmacie. Cette vision globale inclut dans son champ de réflexion et d'action le bouclage des cycles d'énergie et de matières, et pour l'attribut de bioéconomie circulaire est souvent utilisé. Il existe aussi des définitions plus restrictives, qui limitent la bioéconomie au développement de biotechnologies

visant à valoriser les bioressources (ou biomasses) pour la production d'énergie, de molécules et bioproduits à haute valeur ajoutée, ou de matériaux (Langeveld *et al.*, 2012). Ces définitions correspondent souvent à une approche plus linéaire de la bioéconomie.

La bioéconomie, dans son acception globale, permet selon la FAO (Dubois et Gomez San Juan, 2016), d'envisager une approche intégrée des enjeux de la sécurité alimentaire, de changement climatique et de préservation des ressources naturelles et de la biodiversité, dans une perspective de développement économique durable. Dans cette vision large l'agriculture et l'élevage ont toute leur place dans la bioéconomie comme élément transformateur de bioressources et producteur de biens et services (encadré 1).

■ 1.2. La bioéconomie, l'économie circulaire et, l'écologie industrielle et territoriale

La bioéconomie partage de nombreux points avec l'économie circulaire et l'écologie industrielle qui proposent une nouvelle vision des rapports entre l'ensemble

Encadré 1. Quelques définitions.

Les *bioressources* – ou *biomasses* – constituent le « substrat » de la bioéconomie. On y inclut l'ensemble des matières d'origine biologique (à l'exclusion de celles d'origine fossile). Les végétaux terrestres, les algues, les animaux terrestres ou aquatiques, les micro-organismes, les bio-déchets produisent et constituent des bioressources. Les bioressources sont directement ou indirectement issues de la photosynthèse et sont renouvelables.

La *bioéconomie* dans son acception la plus large englobe l'ensemble des activités liées à la production, à l'utilisation et à la transformation de bioressources. Ces activités permettent de répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins en matériaux et en énergie de la société. Elle contribue également à lui fournir des services écosystémiques.

Les *produits biosourcés* sont définis comme étant entièrement ou partiellement issus de bioressources. On peut aussi les qualifier de bioproduits.

des êtres vivants, les techniques, et la biosphère. L'économie circulaire se développe dans les années 1970, en particulier avec la publication du rapport « *The Limits to Growth* » (Meadows *et al.*, 1972). Elle se définit comme un système économique d'échanges et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits, vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien-être des individus. Pour cela, l'économie circulaire promeut un approvisionnement durable en ressources, une consommation responsable, une gestion des déchets favorisant leur recyclage et, le cas échéant, leur valorisation énergétique. Dans cette logique de progrès, le rapport de l'Animal Task Force (2016) souligne les nombreux atouts et le rôle à jouer par l'élevage.

L'écologie industrielle est née d'une réflexion sur la nécessité d'un bouclage des cycles pour améliorer les performances économiques et environnementales des systèmes anthropiques. À la différence d'autres domaines de recherche, son point de départ est une métaphore qui associe les systèmes industriels et les écosystèmes natu-

rels (Ehrenfeld, 2004). Elle s'inscrit dans le concept d'économie circulaire. En France, on parle d'Écologie Industrielle et Territoriale (EIT) pour analyser les interactions sur les territoires entre les sociétés industrielles et la biosphère (Barles, 2010 ; Madelrieux *et al.*, 2017 ; Bonaudo *et al.*, 2017). L'ambition de l'EIT est de mieux comprendre et piloter les interactions entre société et environnement en étudiant les flux de matières et d'énergie mobilisés par les systèmes anthropiques comme les villes, les industries ou les territoires et les modes de gouvernance de ces flux. L'EIT vise à découpler la croissance économique de celle de l'utilisation des ressources en favorisant au niveau territorial le bouclage des flux de matière et d'énergie. Les leviers actionnés peuvent consister en une réorganisation des activités humaines et l'émergence de nouvelles formes de coopération entre acteurs sur les territoires ; ils renvoient également à une optimisation des processus et à la mobilisation de technologies, afin d'économiser les ressources et de diminuer les pollutions par exemple dans les systèmes d'élevage ayant un faible lien au sol (Dumont *et al.*, 2013 ; Thomas *et al.*, 2014). Ce concept, appliqué à l'agriculture, mobilise à la fois des processus industriels (via les technologies) et des processus biologiques, marquant ainsi sa spécificité.

Abel et Blanc (2017) suggèrent que le développement d'une bioéconomie durable implique qu'elle adopte les principes de l'économie circulaire et que l'agriculture, qu'ils considèrent comme l'un des éléments clés d'une bioéconomie durable, adopte les principes de l'agroécologie. C'est un aspect qui est également souligné dans la dernière version de document décrivant la stratégie bioéconomique de l'Union Européenne (EC, 2018).

Dans le reste de cette publication nous considérerons que le terme bioéconomie se réfère à cette vision circulaire de la bioéconomie.

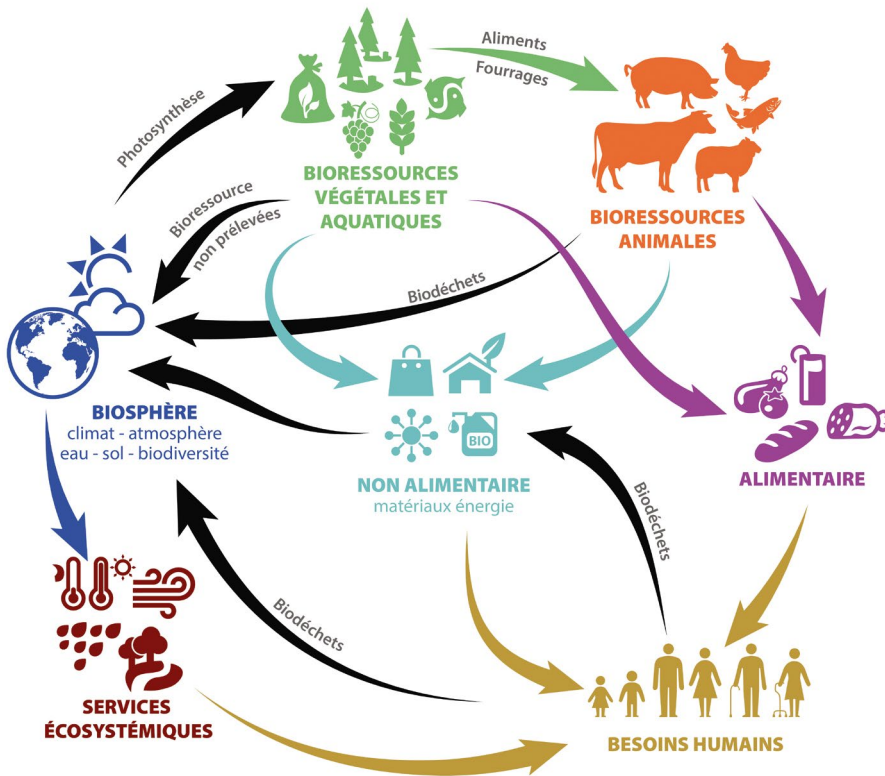
■ 1.3. La bioéconomie et l'élevage

Les travaux scientifiques relatifs à la bioéconomie se réfèrent assez peu aux productions animales. Dans une analyse

bibliométrique récente, D'Amato *et al.* (2017) identifient sur la période 1990-2016, 464 publications avec la terminologie « *Bioeconomy* », dont plus des trois quarts sont postérieures à 2010, indiquant qu'il s'agit bien d'un concept récent. Ces publications sont essentiellement le fait de revues scientifiques spécialisées dans les biotechnologies, l'utilisation de la biomasse, la production d'énergie, l'économie et l'évaluation environnementale. Aucune revue du domaine des sciences animales ne figure dans les 25 revues les plus utilisées pour ces publications. De mêmes, parmi les 30 mots-clés les plus cités dans ces publications aucun ne fait référence aux productions animales. Cette situation peut paraître surprenante dans la mesure où les systèmes d'élevage sont, à l'échelle de la planète, parmi les principaux utilisateurs de biomasse et les principaux utilisateurs des surfaces agricoles (cultures, pâturages, parcours), et qu'ils contribuent largement à la fertilisation des sols et aux apports alimentaires de l'Homme (Steinfeld *et al.*, 2006). En fait la référence à l'élevage dans les publications relatives à la bioéconomie concerne principalement l'utilisation des effluents d'élevage pour la production d'énergie par méthanisation.

De la même manière, les schémas de représentation de la bioéconomie font toujours référence aux bioressources végétales et rarement aux bioressources animales. Ceci ne permet donc pas de représenter finement les interactions entre ces différents bioressources, alors que l'élevage est un moteur majeur des flux de biomasse au sein des territoires. Sur la base du schéma figurant dans le rapport interministériel « Une stratégie bioéconomie pour la France » (2016) nous proposons une modification pour mieux prendre en compte les productions animales dans la bioéconomie (figure 1). Sur ce schéma figurent séparément les bioressources végétales et animales et leurs interrelations, ce qui permet de représenter leurs contributions respectives à la couverture des besoins humains, alimentaires et non alimentaires. Les flux de « déchets » d'origine animale, végétale ou autres sont également représentés, avec leur contribution possible à la couverture de

Figure 1. Schéma de la bioéconomie avec représentation de l'élevage (adapté du rapport « Une stratégie bioéconomie pour la France, enjeux et vision », 2016).



besoins humains et au final leur retour vers la biosphère, principalement le sol. En plus des flux de biomasse figurent également différents compartiments de la biosphère dont l'« état » est susceptible d'être amélioré ou dégradé selon la nature et l'importance des flux qu'ils reçoivent. L'état de la « biosphère » conditionne aussi la nature et l'importance des services écosystémiques qui peuvent être rendus à la société.

Dans la suite de cet article nous allons décrire plus précisément les flux de biomasses associés aux activités d'élevage et leurs contributions à la couverture des besoins humains. Ceci permettra d'explorer les défis et les opportunités d'une meilleure intégration de l'élevage dans la bioéconomie. En effet, l'élevage par son utilisation des sols, ses consommations de Matières Premières Végétales (MPV) et ses déjections est un facteur majeur d'équilibre ou de perturbation des cycles biogéochimiques, des services écosystémiques et de la biodiversité. Il a un rôle majeur dans l'utilisation, la transformation et la fourniture de bioressources.

Plus spécifiquement, nous abordons l'amélioration de l'efficacité productive en favorisant la fermeture des cycles de nutriments, la valorisation de MPV non consommable par l'Homme, le recyclage de coproduits, et la valorisation des effluents. Pour organiser les synergies territoriales entre bioressources végétale et animale il est en effet nécessaire de mieux connaître la nature et l'importance des flux de bioressources mobilisés et générés par l'élevage, leur variation spatiale et temporelle à différent niveau d'organisation (de l'animal au territoire national).

2. L'élevage et l'utilisation de surface agricole

Selon Steinfeld *et al.* (2006), le cheptel mondial utilise directement ou indirectement 70 % des terres agricoles. Le cheptel français utilise directement (pâturages et fourrages) ou indirectement (concentrés) environ 55 % de la SAU, avec 12,5 M ha de prairies (3,2 M ha de prairies temporaires et 9,3 M ha

de prairies permanentes), 1,5 M ha de fourrages issus de plantes annuelles et 1,5 M ha de céréales (Agreste, 2018). Toutefois l'estimation précise des surfaces mobilisées est difficile car elle nécessite de prendre également en compte la contribution des coproduits utilisés en alimentation animale et des matières premières végétales importées. Ceci pose la question de l'allocation des surfaces utilisées pour une même culture qui produit différents coproduits. Par exemple, le tournesol produira de l'huile destinée à la consommation humaine ou à la production de carburant et des tourteaux destinés à l'alimentation animale. Cette comptabilité est réalisée dans les approches d'analyse de cycle de vie qui permettent de calculer l'occupation de surface agricole associée aux différents produits animaux. En combinant ces valeurs avec les statistiques de production on peut alors estimer l'occupation de la SAU associée aux différentes filières animales en France. L'utilisation totale de surface calculée de cette manière (52 % de la SAU) est voisine de la valeur de 55 % rapportée ci-dessus (Agreste, 2018). Les productions bovines contribuent ainsi directement et indirectement à 82,4 % de l'occupation de surface par les productions animales, dont 43,2 % pour la production de viande issue du troupeau allaitant, 13,3 % pour la production de viande issue du troupeau laitier, 23,7 % pour la production de lait et 2,2 % pour la production de veaux de boucherie. Les productions d'agneau, de porc, de volailles et d'œufs contribuent à respectivement 3,7, 5,6, 6,1 et 1,9 % de l'occupation de surface par les animaux (d'après Agribalysse, ADEME, 2014).

Billen *et al.* (2014) estiment que plus de 70 % des matières azotées des cultures agricoles mondiales sont destinées à l'alimentation animale ; pourcentage qui atteint 80 % pour l'Europe selon Sutton *et al.* (2011). Cette consommation d'azote pour les productions animales est à l'origine d'importants échanges internationaux. Même si l'élevage valorise en grande partie des ressources non consommables par l'Homme comme les pâturages, les fourrages conservés, les coproduits ou sous-produits, il peut aussi rentrer en concurrence avec l'alimentation humaine.

La forte contribution des ruminants à l'occupation de surfaces est principalement liée à l'utilisation des prairies qui représentent à l'échelle nationale environ 45 % de la SAU. À l'échelle des parcelles les prairies sont le support d'une biodiversité floristique et faunistique qui peut être favorisée par des conduites spécifiques de fauche et de pâturage (Dumont *et al.*, 2016). Les prairies augmentent également la diversité des paysages agricoles et de ce fait influencent positivement la biodiversité à l'échelle des territoires (Dumont *et al.*, 2016). Plus généralement, les systèmes d'élevage contribuent également à accroître la diversité des assolements dans les exploitations et dans certaines régions à préserver le bocage (Dourmad *et al.*, 2017). Les prairies contribuent aussi à l'atténuation du changement climatique par la fixation de carbone. En Europe la séquestration de carbone des prairies permanentes est estimée à 500 à 1 200 kg C/ha/an (Soussana et Lüscher, 2007 ; Dollé *et al.*, 2013).

3. Les flux de bioressources associés ou générés par l'élevage

Dans les exploitations de poly-culture-élevage les nutriments s'insèrent dans des cycles qui associent les pôles végétal et animal (figure 2 ; Petersen *et al.*, 2007 ; Bonaudo *et al.*, 2014). Les échanges entre ces deux pôles sont assurés par l'utilisation de cultures, de pâturages et de parcours pour l'alimentation des animaux et le

recyclage de leurs déjections comme fertilisants. Les aliments et les déjections peuvent être stockés avant d'être utilisés ou directement prélevés et épandus par les animaux au pâturage. L'élevage joue un rôle important dans le maintien de la fertilité des terres agricoles, surtout en l'absence de fertilisation minérale, l'apport de matières organiques issues de l'élevage étant alors le principal fertilisant. Les déjections sont la deuxième source d'azote en France avec 1,82 Tg N/an (1 Tg = 10¹² g = 1 million de tonnes) juste derrière les 2,11 Tg N/an d'engrais (Peyraud *et al.*, 2012). Cet azote est essentiel au maintien de la fertilité des sols mais il est aussi à l'origine de pollutions diffuses.

Au cours du XX^e siècle, la spécialisation des exploitations et des territoires a conduit à la dissociation progressive des pôles végétal et animal. Les éleveurs font désormais appel à des intrants, principalement des aliments concentrés, mais aussi des médicaments, des engrais, des produits phytosanitaires et de l'énergie. Le corollaire de cette spécialisation est un excédent et une mauvaise valorisation des effluents dans les exploitations et territoires d'élevage et l'appauvrissement en matière organique des sols des exploitations et territoires céréaliers. La régionalisation des productions rend plus difficile les échanges d'effluents entre exploitations, alors que le développement de l'industrie de l'alimentation animale organise le transport des céréales, des oléo-protéagineux et des coproduits agroalimentaires sur de longues distances. Ce constat est particulièrement avéré pour les élevages

de monogastriques, les élevages de ruminants restant plus liés au sol par la production de fourrages et le pâturage, ce qui favorise une meilleure valorisation des effluents.

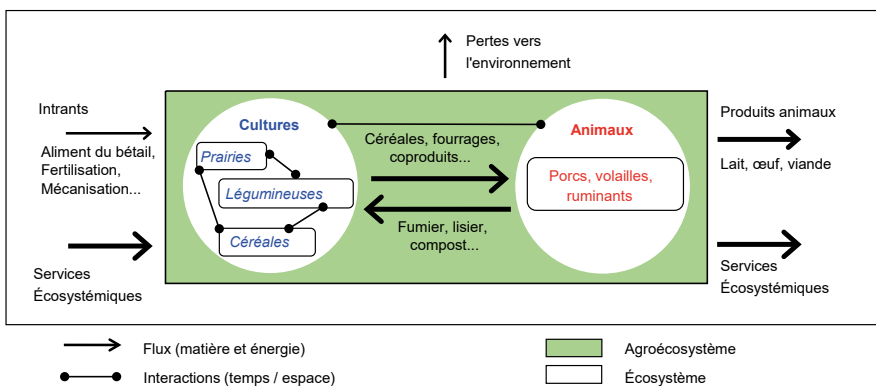
À l'échelle du système d'élevage, l'efficacité globale d'utilisation des nutriments dépend à la fois de l'efficacité des différents processus (élevage des animaux, gestion des effluents, rotation des cultures...) et de la cohérence globale du système ; cette dernière conditionne l'importance des intrants (aliment, engrais), les besoins en surface et les possibilités de recyclage des éléments. Un système peu efficace à l'échelle de l'animal (rétention faible) peut être efficace à l'échelle globale lorsque les effluents sont bien valorisés et que les pertes vers l'environnement sont faibles. À l'inverse des animaux efficaces ne suffisent pas à garantir l'efficacité à l'échelle du système si les nutriments sont mal recyclés du fait de pertes importantes par volatilisation ou épandus en excès sur les cultures.

■ 3.1. Utilisation de l'azote, du phosphore et du carbone par les animaux

Le pourcentage de rétention azotée est très variable, de 10 à 55 % selon l'espèce animale (figure 3). La quantité d'azote excrété varie entre 45 et 90 % de l'azote ingéré. Toutefois, seule une fraction de l'azote excrété est réellement valorisable pour la fertilisation, compte tenu des émissions gazeuses dans le bâtiment, au stockage et à l'épandage. Dans le cas des vaches allaitantes conduites à l'herbe et dans une moindre mesure dans le cas des vaches laitières, les émissions gazeuses sont relativement faibles, une part importante des déjections étant excrétée au pâturage avec peu de pertes gazeuses. À l'inverse, dans le cas des volailles et des porcs élevés sur litières les pertes gazeuses sont plus importantes. Les porcs élevés sur caillebotis avec production de lisier se trouvent en situation intermédiaire.

La réduction des émissions gazeuses dans les différents systèmes d'élevage constitue un objectif prioritaire dans la mesure où une part de ces émissions

Figure 2. Représentation des flux de nutriments dans une exploitation d'élevage (d'après Bonaudo *et al.*, 2014).



se fait sous des formes polluantes (NH_3 , N_2O et NO_x) et que ces émissions doivent être compensées à l'échelle du système par des apports exogènes d'azote (engrais minéraux, fixation symbiotique). Par ailleurs, la volatilisation totale de composés azotés et leur forme peuvent fortement varier selon le mode de gestion des effluents. Elle dépasse ainsi 60 % de l'azote excrété pour les modes de gestion solides (fumier, compost) et avec traitement aérobic. Le mode de gestion des effluents associant collecte de lisier frais, couverture des fosses et injection de lisier est celui qui permet le mieux de recycler l'azote (25 % d'émission gazeuses et 75 % de recyclage) (Bonneau *et al.*, 2008). Une fois épandu, la partie de l'azote des effluents, à l'instar de l'azote des engrais minéraux, peut être lessivée dans des proportions qui dépendent de l'équilibre entre les apports et les besoins des plantes, ce qui affecte également l'efficacité du recyclage réel (Peyraud *et al.*, 2012).

L'efficacité de rétention du phosphore par les animaux est la plus élevée pour le poulet standard, suivi du porc, du poulet label rouge et de la vache laitière (figure 3) ; les poules pondeuses et les vaches allaitantes présentant les efficacités les plus faibles. La quantité de phosphore recyclable représente entre 85 et 48 % du phosphore ingéré. Compte tenu de l'absence de volatilisation, elle est peu sensible aux modalités d'élevage et de gestion des effluents.

Pour toutes les espèces, le carbone retenu représente une faible fraction

de l'ingéré (10 à 20 %). Les émissions gazeuses constituent de loin le flux le plus important (figure 3). Il s'agit principalement du CO_2 émis lors de la respiration et dans une moindre mesure du CH_4 entérique (surtout chez les ruminants) ou émis pendant le stockage des effluents. Le carbone excrété, qui correspond à la fraction non digestible de l'aliment, se retrouve principalement dans les fèces. Cette part est faible pour les animaux monogastriques qui reçoivent des aliments dont la digestibilité de la matière organique est élevée. Toutefois elle peut varier significativement selon la nature du régime, en particulier chez les ruminants et chez le porc. À titre d'exemple, un enrichissement même modéré en fibres du régime d'un porc à l'engrais peut s'accompagner d'une augmentation de plus de 50 % de l'excrétion de matière organique (Jarret *et al.*, 2011) accroissant ainsi largement le potentiel de production de CH_4 .

■ 3.2. Les bioressources pour l'alimentation des animaux

a. Flux de matières premières

La consommation totale d'aliments par les animaux élevés en France s'élève à 113 Millions de tonnes (Mt) en 2015 ; c'est le flux de bioressources le plus important à l'échelle nationale. Avec environ 70 % du total, les fourrages représentent la part principale de ces aliments, suivis des aliments produits par l'industrie de fabrication d'aliments du bétail (FAB) (19 %) et des matières premières utilisées à la ferme (FAF) (11 %) (Agreste, 2018). Les céréales et leurs coproduits (utilisés en

FAB et FAF) constituent la part principale des aliments concentrés. Sur les 53,8 Mt de céréales produites en France (hors riz et maïs ensilage), 37,8 Mt sont exportées sous la forme de grains ou de produits transformés, 5,7 Mt sont utilisées en alimentation humaine après transformation et 16,7 Mt sont utilisées en alimentation animale, soit directement à la ferme (6,9 Mt) soit dans les aliments concentrés (9,3 Mt) sous forme de grains ou de coproduits. L'alimentation animale utilise trois fois plus de céréales que la consommation humaine, soit l'équivalent de 31 % de la production nationale, pour partie sous forme de coproduits.

La composition et la destination des aliments issus de la FAB sont bien connues (Agreste, 2018) alors que celles des fourrages est des aliments FAF le sont moins. Les aliments FAB sont consommés principalement par les volailles (42 %), les bovins (26 %) et les porcs (24 %). Ils contiennent en moyenne 48 % de céréales, principalement du blé et du maïs, 42 % de coproduits et 1,5 % de protéagineux. Parmi les coproduits, les tourteaux d'oléo-protéagineux sont les plus importants (32 % de tourteau de soja, 21 % de tourteau de colza et 15 % de tourteau de tournesol), suivi des coproduits de transformation des céréales (26 % de sons, remoulages, drèches, solubles...) (Agreste, 2018).

L'utilisation du tourteau de soja (protéagineux) est en baisse (3,5 Mt en 2015, - 19 % en dix ans). Il est remplacé par du tourteau d'oléagineux comme le tourteau de colza (2,7 Mt en 2015, + 75 % en dix ans) et de tournesol (1,5 Mt en 2015, + 115 % en dix ans). Les autres protéagineux (hors soja) ayant actuellement une contribution négligeable alors que dans les années 90 on en utilisait environ 2 Mt en alimentation animale en France, en particulier du pois, de la féverole et du lupin (Marouby, 2016). L'accroissement de l'utilisation de tourteau de colza a été largement favorisé par le développement de la production de biocarburants. Par ailleurs le recours aux acides-aminés produits par les bio-industries a également beaucoup contribué à la réduction de la teneur en protéines des rations, et au remplacement d'une partie du tourteau de soja

Figure 3. Efficacité d'utilisation de l'azote (N), du phosphore (P) et du carbone (C) par différentes espèces et productions animales (d'après Corpen 1999, 2001 ; Faverdin *et al.*, 2006 ; Giovanni et Dulphy, 2008 ; Rigolot *et al.*, 2008 ; ITAVI, 2013 ; Dourmad *et al.*, 2016).

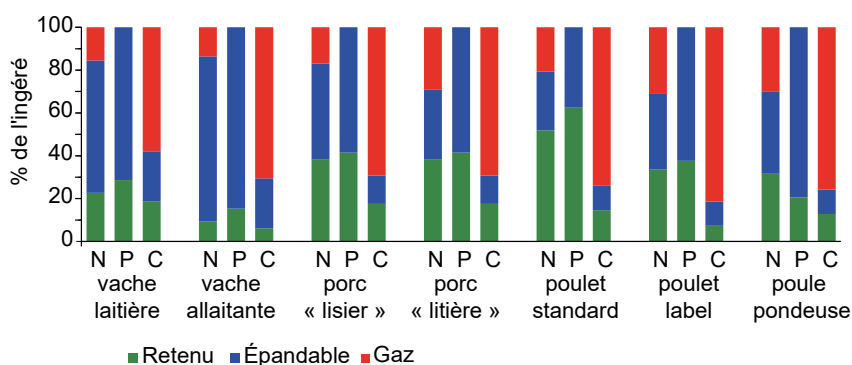
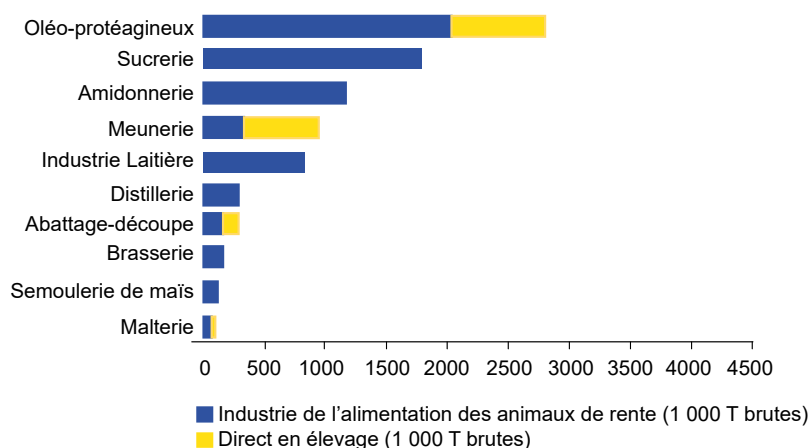


Figure 4. Contribution de l'alimentation animale à la valorisation des coproduits de différentes bioindustries (Reseda, 2017).



par des céréales et des acides aminés, en particulier pour le porc.

La majorité des coproduits sont valorisés sous forme sèche et pour la plupart en FAB. Il existe toutefois une part des coproduits qui est valorisée directement sous forme humide à proximité et en partenariat avec l'industrie agroalimentaire. Les coproduits utilisés directement en élevage proviennent principalement des industries de la

sucrierie, des oléagineux, de la brasserie et de l'industrie laitière (figure 4).

Le taux de couverture national des besoins en matières premières riches en protéines (tourteaux, protéagineux, drèches) pour l'alimentation animale s'élève environ à 55 % (Marouby, 2016). Cette valeur est supérieure à la moyenne de l'UE dont le taux de couverture est de seulement 30 %. En moyenne les incorporations de tourteaux importés, y compris sous forme de graines oléagineuses,

représentent en quantité environ 11 % des aliments concentrés, hors fourrage. Cette valeur est aussi plus faible que pour la moyenne de l'UE estimée à 18 % (d'après Dumont *et al.*, 2016).

b. Flux de matières azotées

À l'échelle nationale, le cheptel (ruminants et monogastriques) consomme d'importantes quantités de protéines (tableau 1). Il s'agit principalement de fourrages (7,91 Mt de MAT), suivis par des tourteaux (3,31 Mt de MAT), des céréales (1,80 Mt de MAT), des coproduits (0,52 Mt de MAT) et des oléo-protéagineux (0,22 Mt de MAT). Les ruminants sont les plus gros consommateurs de protéines (100 % des fourrages et plus de 49 % des concentrés). Ils consomment 54 % des tourteaux et valorisent fortement les coproduits (75 % des coproduits). Les monogastriques consomment deux fois plus de céréales que les ruminants (67 % des céréales), peu de coproduits et presque autant de tourteaux que les ruminants.

Si on compare cette consommation à l'offre nationale de Matières Premières Végétales (MPV) disponibles pour l'alimentation animale, la France

Tableau 1. Bilan annuel moyen d'utilisation des matières premières végétales (MPV), en millions de tonnes de protéines (Mt MAT), pour l'ensemble du cheptel métropolitain (ruminants et monogastriques). (Moyenne des années 2010-2011-2012, d'après Therond *et al.*, 2017).

Flux en Mt MAT	Concentrés					Fourrages ^f	Total Aliments
	Céréales ^b	Oléo-protéagineux ^c	Tourteaux ^d	Coproduits ^e	Total concentrés		
Disponibilité de MPV ^a pour l'alimentation animale	1,910	0,164	0,699	0,628	3,401	8,255	11,656
Consommation totale de MPV	1,805	0,226	3,312	0,527	5,870	7,916	13,786
<i>Par les monogastriques</i>	1,214	0,115	1,528	0,129	2,986	0	2,986
<i>Par les ruminants</i>	0,591	0,111	1,784	0,398	2,884	7,916	10,800
Bilan : Disponibilité – Consommation	0,105	- 0,062	- 2,613	0,101	- 2,471	0,339	- 2,132

^a MPV : Matière Première Végétale ;

^b blé, orge, triticale, maïs grain, seigle, avoine, sorgho, mélanges et autres céréales ;

^c colza, tournesol, soja, lin, pois, fèves et féveroles, lupin ;

^d colza, tournesol, soja ;

^e pulpes de betterave, mélasse de betterave, issues de meunerie, luzerne déshydratée, corn gluten feed, gluten 60 ;

^f maïs fourrage, autres fourrages annuels, prairies permanentes et prairies temporaires.

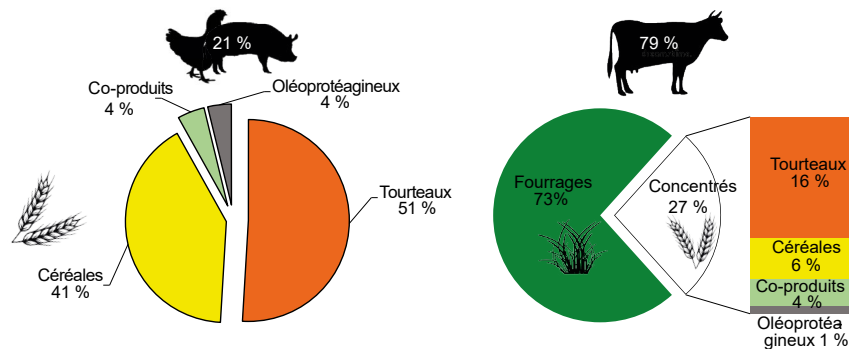
est excédentaire pour les fourrages (104 % d'autonomie), les céréales (106 % d'autonomie) et les coproduits (119 % d'autonomie). Elle est déficitaire en tourteaux (seulement 21 % d'autonomie) et en oléo-protéagineux (72 % d'autonomie). Ces deux dernières catégories de MPV sont importées pour combler le déficit en protéines. Ceci correspond à une importation de l'équivalent de 45 % des protéines des aliments concentrés (tableau 1). Si l'on tient compte de l'ensemble des sources de protéines, y compris les fourrages, le bilan est beaucoup moins déficitaire avec une autonomie protéique nationale pour l'alimentation des animaux de 81 % (Jouven *et al.*, 2018).

La consommation totale de MPV s'élève à 13,8 Mt de MAT (figure 5). Les fourrages représentent 58 % de cette consommation et les concentrés 42 %. Les deux principaux concentrés consommés sont les tourteaux (24 %) et les céréales (13 %). Les coproduits représentent 4 % de la consommation de MAT. Les ruminants, du fait de leur nombre important, consomment 79 % de la totalité de la MAT des MPV contre 21 % pour les monogastriques. Les ruminants consomment majoritairement des MAT issues des fourrages (73 %) suivis des tourteaux (16 %), des céréales (6 %), des coproduits (4 %), des oléo-protéagineux (1 %). Les monogastriques consomment principalement des protéines issues des tourteaux (51 %) et des céréales (41 %), suivi de coproduits (4 %) et d'oléo-protéagineux (4 %).

c. Importance de la diversité régionale

Dans le cadre de la bioéconomie circulaire il est également important de prendre en compte les interactions entre élevages et cultures à des échelles plus fines que l'échelle nationale, puisque les complémentarités entre les différentes activités se construisent plus facilement lorsqu'elles se trouvent à proximité et elles nécessitent moins de transports. Ce travail a été réalisé à l'échelle des petites régions agricoles (PRA) françaises, où l'élevage est significativement présent, dans le cadre de l'étude INRA « EFESÉ-Écosystèmes Agricoles » (Jouven *et al.*, 2018). L'analyse de la variabilité entre PRA réalisée dans

Figure 5. Répartition de la consommation de matières azotées par les ruminants et les monogastriques et contribution des différentes sources de matières premières végétales (d'après Therond *et al.*, 2017).



cette étude indique de fortes disparités spatiales dans la capacité des PRA à nourrir les animaux qu'ils hébergent. Ainsi 18 % des PRA présentent une très faible (< 70 %) ou une faible autonomie (70 et 90 %), 35 % présentent un très fort excédent (> 130 % d'autonomie) et 47 % ont un niveau d'autonomie proche de 100 % ou modérément excédentaire (Jouven *et al.*, 2018).

Les PRA à autonomie faible et très faible sont concentrées au cœur des bassins de production animale :

i) dans la zone intensive du Grand-Ouest (Bretagne, Pays de Loire et Nord-Ouest du Poitou) où se combine élevage de vaches laitières hautes productrices et de monogastriques. Les surfaces cultivées le sont essentiellement pour l'alimentation des animaux. En Bretagne par exemple elles sont dominées par les céréales et oléo-protéagineux (35 %), le maïs fourrage (19%) et les prairies temporaires (31 %) (Dourmad *et al.*, 2017). Dans cette région, avec le plus faible niveau d'autonomie à l'échelle nationale, le déficit en MPV premières pour l'alimentation animale était estimé à 5,6 millions de tonnes en 2013 soit un peu plus l'équivalent de la totalité de la production régionale de MPV qui s'élevait à 5 millions de tonnes (cité par Dourmad *et al.*, 2017). Les céréales représentent la part principale de ce déficit (40 %), suivi du tourteau de soja (18 %), du tourteau de colza (14 %), des coproduits (10 %) et du tourteau de tournesol (7 %). Les matières premières végétales « importées » correspondent à une SAU d'environ 670 000 ha, soit l'équivalent de 40 % de la SAU régionale. On estime

qu'environ 37 % de ces importations correspondent à des cultures situées en dehors de l'UE (principalement du soja au Brésil et en l'Argentine et du tournesol dans la région de la Mer Noire) ;

ii) dans les montagnes humides du Massif central et le piémont intensif avec d'importantes surfaces en prairies permanentes et une orientation lait-viande ;

iii) dans les montagnes laitières (Vosges, Franche Comté, Alpes) ainsi que dans le Nord-Pas de Calais et la zone pastorale méditerranéenne.

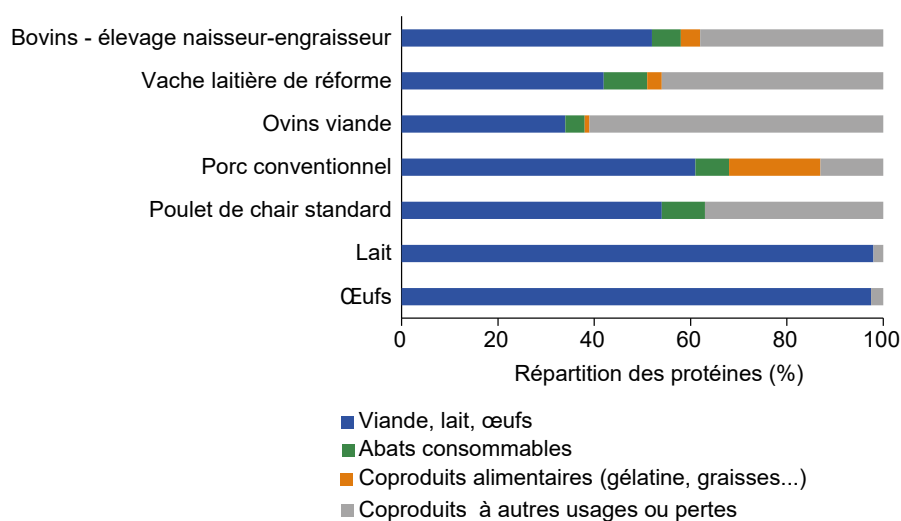
Les PRA autonomes sont localisées dans les zones herbagères productives du Nord-Ouest et du Nord Est à dominante laitière (Basse Normandie, Lorraine) et sur la bordure Nord et Ouest du Massif central à dominante allaitante.

Les PRA très excédentaires sont localisées dans les zones polyculture-élevages du bassin aquitain et en bordure du bassin parisien. Les cultures y sont dominantes et l'élevage est en forte régression. On pourrait y adjoindre les PRA céréalières qui représentent environ 15 % des PRA non prise en compte dans cette étude.

■ 3.3. Les flux vers l'alimentation humaine

Dans le cadre de la bioéconomie, l'élevage est considéré comme une « bioactivité » ou une « bioindustrie » permettant de transformer des bio-sources végétales, consommables ou non par l'Homme, en aliments à haute

Figure 6. Répartition des protéines corporelles des animaux, ou de leurs produits, entre les parties consommables ou non (d'après Laisse et al., 2017).



valeur nutritionnelle pour l'Homme, en particulier des protéines très digestibles et bien équilibrées en acides aminés, des minéraux, des oligoéléments et des vitamines. Toutefois, seule une part des animaux ou de leurs productions est consommable par l'Homme, de sorte que des coproduits animaux sont également générés (figure 6, Laisse et al., 2017). Pour le lait et les œufs la part des protéines consommables est voisine de 100 % alors qu'elle est plus faible et très variable selon les espèces pour la production de viande, avec des valeurs extrêmes variant au niveau de l'animal entre 39 % pour les ovins et 87 % pour le porc.

Selon les résultats de la dernière étude de l'Anses (2017), l'ensemble des produits animaux (produits laitiers et viandes, poissons, œufs) contribuent à environ 60 % des apports protéiques des français, quel que soit l'âge, avec une contribution décroissante des produits laitiers avec l'âge (figure 7). La contribution des produits animaux aux apports lipidiques est plus faible que pour les protéines et s'élève à environ 40 %, avec comme pour les protéines une part des produits laitiers qui diminue avec l'âge. La contribution des produits animaux aux Apports Énergétiques Totaux (AET), 21 % en moyenne, est plus faible que pour les protéines et les lipides. Ceci s'explique par le fait que 46 % des AET sont assurés par les glucides d'origines végétales (amidon et sucre) qui sont absents des produits animaux. Chez les enfants, les produits laitiers sont

les premiers contributeurs des apports en calcium (58 %) et en iode (44 %) ainsi qu'en vitamine D (63 %). Depuis quelques années, on observe en France comme en Europe une réduction de la consommation de produits animaux, en particulier celle de viande bovine et ovine et dans une moindre mesure celle de porc et de produits laitiers alors que la consommation de viande de volailles et de produits de la mer s'accroît.

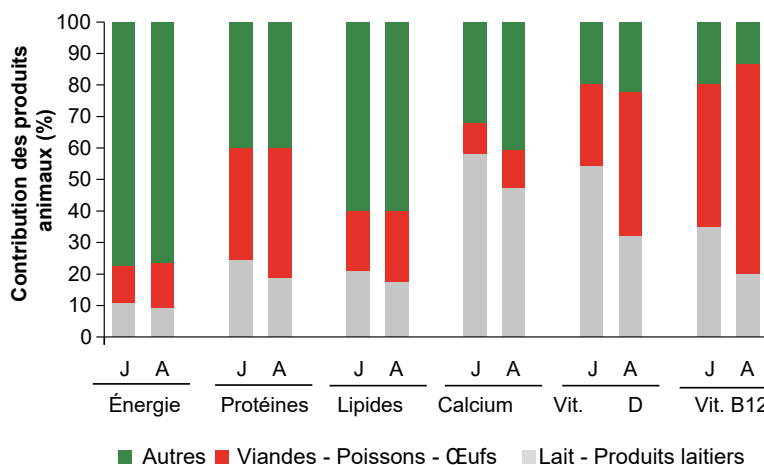
■ 3.4. Les flux d'effluents

La quasi-totalité des effluents produits par les animaux sont utilisés pour la fertilisation des sols, soit directement lorsque les animaux sont élevés au pâturage soit après un stockage sous

forme liquide (lisier) ou solide (fumier, fientes). Les effluents sont en majorité épandus comme fertilisant sur les terres de l'exploitation ou dans des exploitations voisines, dans le cadre d'un plan d'épandage. En moyenne à l'échelle nationale les effluents d'élevages représentent un peu plus de 1/3 des apports totaux azotés et la moitié des apports en phosphore. Leur contribution est cependant très dépendante de la densité animale (Peyraud et al., 2012). Avec en moyenne 130 kg N/ha SAU, elle est la plus élevée en Bretagne où les effluents d'élevage contribuent à environ 75 % des apports totaux azotés (Dourmad et al., 2017). Malgré des apports faibles par ha (< 50 kg/ha) les effluents d'élevages ont également une contribution majoritaire aux apports d'azote dans les zones extensives d'élevage où les apports de d'azote minéral sont quasi nuls. Leur contribution est par contre très faible dans les zones céréalières.

Toutefois, dans les zones à forte densité animale les possibilités d'épandages des effluents sont parfois inférieures aux quantités produites. Les effluents subissent alors différents traitements visant le plus souvent à réduire leur charge en azote ou en phosphore et à produire des fractions mieux maîtrisables (séparation de phase, digestats), hygiénisées (composts, effluents séchés), désodorisées (composts, digestats) ou plus facilement transportables (composts, effluents solides ou séchés). Les principaux traitements réalisés

Figure 7. Contribution des produits animaux aux apports moyens d'énergie, de protéines, de lipides, de calcium et de vitamines D et B12, chez les jeunes (J < 18 ans) et les adultes (A) (d'après Anses, 2017).



concernent la séparation de phase et l'épuration biologique par digestion aérobie pour les lisiers, le compostage pour les fumiers (éventuellement pour les lisiers en ajoutant de la paille ou d'autres produits végétaux), la digestion anaérobie majoritairement pour les lisiers mais possible également pour les fumiers. La digestion aérobie et le compostage entraînent des pertes d'azote, qui même si elles se font majoritairement sous forme non polluante (N_2), constituent des pertes à l'échelle du système. Un peu plus de 2 millions de m^3 de lisier de porcs sont ainsi traités en Bretagne, surtout par digestion aérobie, pour un abattement d'environ 5 600 tonnes d'azote (Levasseur et Lemaire, 2006) ce qui correspond à près de 10 % de l'azote des effluents porcins. La production d'engrais organiques transportables sur de longues distances permet aussi de réduire la pression en azote et en phosphore sur des zones à forte concentration d'élevage et de trouver de nouvelles complémentarités entre exploitations porcines ou avicoles et d'autres exploitations (céréalières, maraîchères...), tout en assurant un bon recyclage des éléments. Le traitement par méthanisation des effluents d'élevage, souvent en association avec d'autres substrats organiques d'origine végétale ou issus de l'industrie agro-alimentaire, peut aussi être utilisé pour produire de l'énergie (biogaz, électricité, chaleur). Cette voie est intéressante car elle permet de contribuer à la couverture des besoins énergétiques sans affecter la valeur fertilisante des effluents. Elle s'accompagne toutefois d'une réduction de la teneur en matière organique de l'effluent qui pourrait à terme entraîner des effets sur la teneur en matière organique des sols.

Les Instituts Techniques en collaboration avec l'ADEME ont développé un outil informatisé (Elba, 2018) qui permet d'estimer à l'échelle des régions, des départements ou des cantons, la bioressource agricole, d'origine végétale ou animale, potentiellement utilisable pour la production d'énergie par méthanisation. Pour les effluents d'élevage cette bioressource est calculée pour les différentes espèces animales en tenant compte des effectifs concernés, des modalités de collecte des effluents (lisier, fumier...) et

du temps de présence des animaux en bâtiments. La contribution de la paille ajoutée pour la constitution des litières est également prise en compte. Sur cette base les effluents d'élevage représentent environ 120 Millions de tonnes (Mt) de matière brute, 24,2 Mt de matière sèche et 19,4 Mt de matière organique. Les effluents liquides (lisier) représentent 30 % de la masse pondérale totale mais seulement 8 % de la matière organique. Au total le potentiel de production de méthane de la matière organique des effluents d'élevage correspondrait à 45 TWh d'énergie primaire (Elba, 2018) issue pour 76 % de la filière ruminants (bovins, ovins, caprin), 10 % de la filière équine, 9 % de la filière avicole et 5 % de la filière porcine. Ceci correspond à une valeur proche de la production hydroélectrique française qui s'élève à 54 TWh. Les régions du Grand-Ouest (Bretagne, Pays de Loire, Basse Normandie) contribuent à elles seules 34 % du potentiel total (figure 8). À titre de comparaison la biomasse végétale (pailles, menues pailles, rafles...) disponible (production techniquement récoltable moins usages actuels) s'élève à 6,6 Mt de matière sèche.

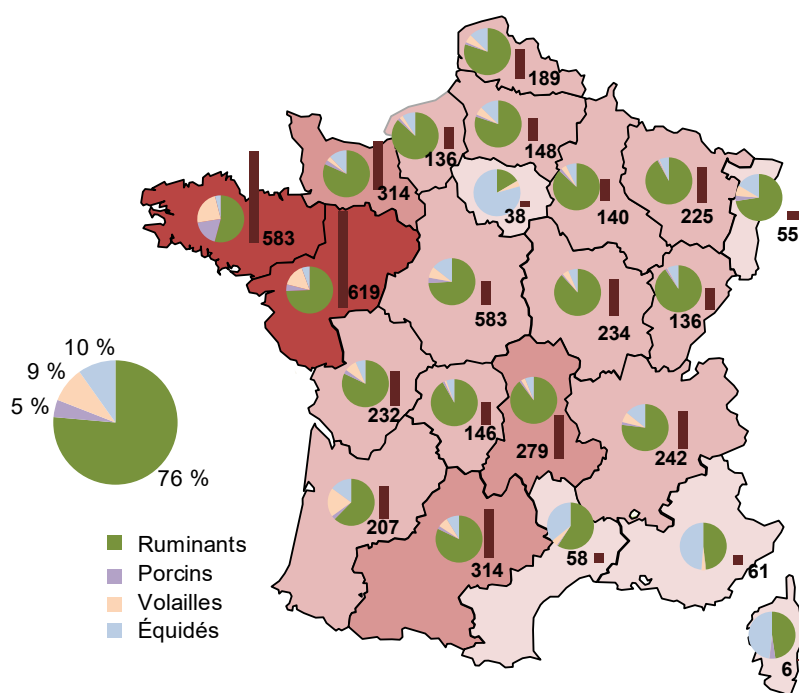
L'ADEME estime que seulement 2,4 Mt de matière brute d'effluents, principalement du lisier, étaient métha-

nisées en 2016, soit environ 2 % de la quantité totale disponible. Dans la même étude, 236 unités de méthanisation en service à la ferme et 31 unités centralisées ont été recensées en France au 1^{er} janvier 2016, pour une puissance électrique installée de 78 MW équivalente. Cette situation contraste avec celle de l'Allemagne où l'on comptait 9 300 unités de biogaz pour une puissance électrique installée de 4 500 MW équivalente fin 2016 (Fachverband Biogas, 2017).

Les perspectives de développement de la méthanisation des effluents d'élevages pour la production de gaz ou d'électricité sont donc très importantes. L'ADEME (2016) prévoit une mobilisation de 30 % des effluents d'élevage à l'horizon 2030 et 50 % à l'horizon 2050. Avec les technologies actuelles l'IFIP (in ADEME, 2016) considère qu'il serait possible de mobiliser 30 % des lisiers de porc à horizon 2030 et 80 % à horizon 2050. Une mobilisation de 25-30 % est également envisagée pour les effluents bovins par l'IDELE à horizon 2030, mais de nouvelles technologies seront nécessaires pour aller au-delà.

Malgré un pouvoir méthanogène relativement limité les effluents d'élevage par leur quantité et disponibilité

Figure 8. Répartition du potentiel de production de biométhane (barres verticales, millions $Nm^3 CH_4$) des effluents d'élevages selon les régions et les espèces animales (d'après Elba, 2018).



s'avèrent être des bioressources particulièrement intéressantes pour la méthanisation. Ils apportent aussi l'ensemble des nutriments et micronutriments nécessaires au développement des micro-organismes responsables de la digestion anaérobie ; du fait de leur fort pouvoir tampon ils permettent de stabiliser le pH du digesteur, ce qui est un atout majeur de stabilité du procédé (Béline *et al.*, 2010 ; Weiland, 2013). Toutefois pour accroître l'efficacité des digesteurs, les effluents d'élevage sont souvent associés à d'autres bioressources, en particulier de la biomasse végétale et des coproduits issus de l'industrie agroalimentaire. Un travail d'inventaire similaire à celui réalisé pour la bioressource agricole est en cours pour les résidus et coproduits organiques des agro-industries (www.valormap.fr/).

■ 3.5. Les coproduits animaux issus de l'agro-industrie

Il existe de nombreux coproduits et sous-produits animaux non-consommables par l'Homme. Une large partie de ces bioressources est tout de même valorisée (figure 9). Chaque sous-produit animal a des usages différents en fonction du risque sanitaire qu'il peut représenter. On distingue trois catégories de produits :

i) la Catégorie 1 est destinée à la destruction, elle concerne les sous-produits suspects de maladies transmissibles à l'homme ou aux animaux ou pouvant contenir des contaminants dangereux ;

ii) la Catégorie 2 est interdite en alimentation animale. Elle est constituée de sous-produits animaux issus d'un animal mort en dehors d'un abattoir, ou contenant des résidus de médicaments ;

iii) la Catégorie 3 est valorisable en alimentation animale, en particulier pour l'alimentation des animaux familiers et des poissons. Elle comporte des sous-produits issus d'animaux sains abattus en abattoirs et déclarés propres à la consommation humaine.

Les coproduits animaux sont transformés dans des unités de production dédiées en fonction de leur catégorie et leur valorisation potentielle, en Protéines Animales Transformées (PAT) et graisses (SIFCO, 2010). Les graisses et PAT de catégorie 1-2 sont majoritairement brûlées et produisent de l'énergie et une autre partie sert de fertilisant. Pour la catégorie 3, les graisses sont valorisées pour 55 % en savonnerie et oléo chimie et pour 40 % elles intègrent les aliments pour animaux familiers et l'aliment du bétail. Les PAT sont valorisés à 80 % dans les aliments pour animaux familiers et les aliments pour les poissons.

La diversité des utilisations des bioproduits issus des animaux est en fait très grande et concerne de nombreux secteurs d'activités. Meindertsma (2007) a ainsi identifié près de 200 utilisations différentes. Les bioproduits animaux sont ainsi utilisés dans l'industrie pharmaceutique, l'habillement, la cosmétique, la joaillerie, la production de détergents, la décoration et le matériel d'art, les transports, la production d'énergie, de fertilisant, etc.

4. Un exemple de bioéconomie circulaire dans un territoire à forte empreinte animale

Après avoir décrit les différents flux de bioressources utilisées et générées par les activités d'élevage (bioéconomie), nous allons illustrer comment des systèmes peuvent être conçus dans l'objectif de mettre ces flux en relation les uns avec les autres, pour accroître l'efficacité globale, en réduisant les pertes dans l'environnement. Ce processus relève de la bioéconomie circulaire, associant la bioéconomie au concept d'économie circulaire, dans une perspective de bouclage des cycles.

Nous proposons de l'illustrer par une étude de cas la stratégie de bioéconomie circulaire adoptée par une coopérative porcine de l'Ouest de la France (Cooperl Arc Atlantique). Celle-ci associe sur un même site des activités de production de chaleur, de production de biogaz, d'abattage et de découpe de porc, de traitement et de recyclage de l'eau, de traitement d'effluents et de production d'engrais organiques (figure 10).

Le site où sont implantés la majorité des activités est à l'origine un site d'abattage et de découpe de porcs. Différents équipements y ont été implantés progressivement afin d'assurer une production renouvelable d'énergie thermique, le traitement et le recyclage de l'eau, la valorisation des coproduits animaux, la production de fertilisants organiques et à court terme la production de biogaz (Convers *et al.*, 2018).

Figure 9. Flux de sous-produits animaux et leur valorisation (France, tonnes de matières brutes, d'après SIFCO, 2010).

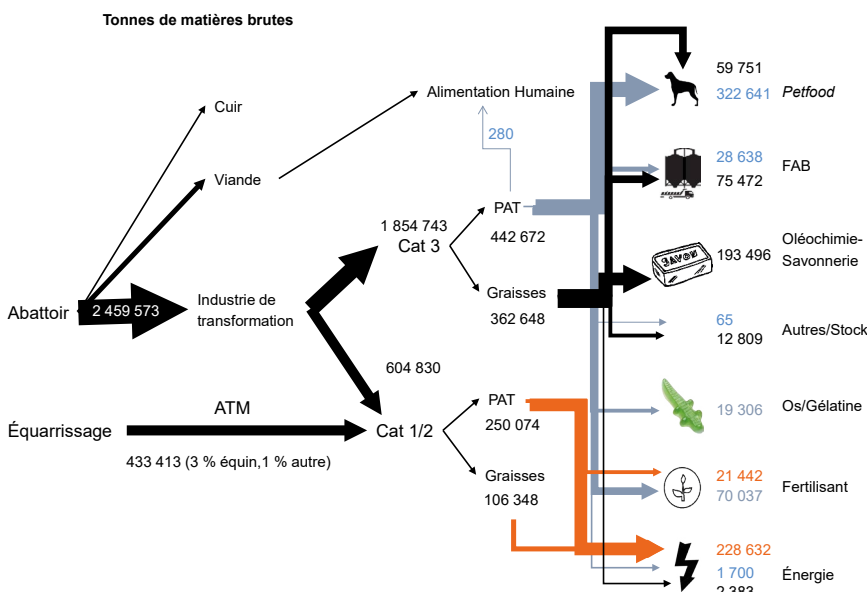
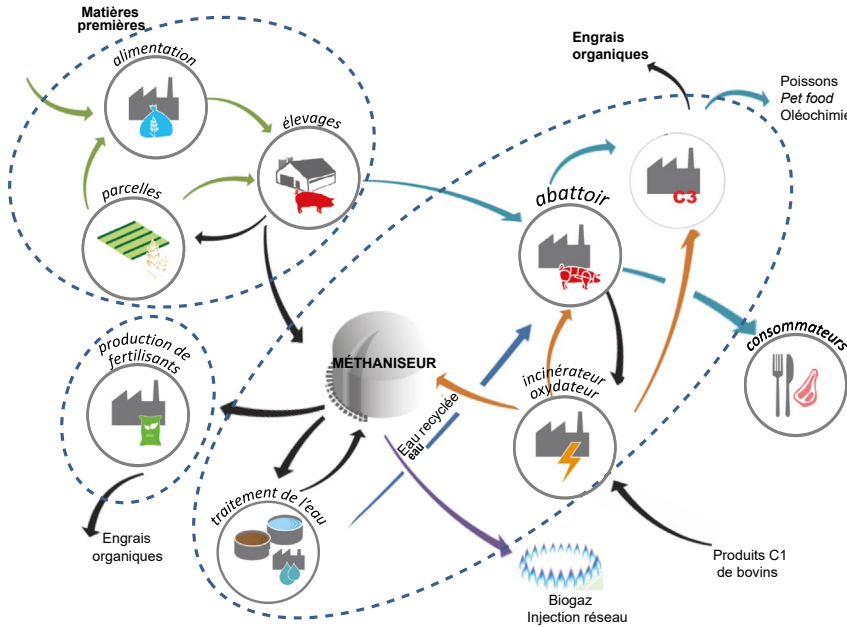


Figure 10. Exemple de bioéconomie circulaire dans un territoire à forte empreinte animale. Configuration bioindustrielle associant sur un même site des activités de production de chaleur, de production de biogaz, d'abattage et de découpe de porcs, de traitement et de recyclage de l'eau, de traitement d'effluents et de coproduits animaux et de production d'engrais organique (d'après Crespel-Darcet, 2016 ; Convers et al., 2018).



Le site produit 80 % de l'énergie thermique utilisée, en incinérant des déchets, principalement des sous-produits animaux de catégorie 1 et 2 provenant d'unités d'équarrissage extérieures et différents déchets organiques produits sur le site. La chaleur ainsi générée est utilisée successivement dans les différents processus d'abattage, de découpe et de transformation des viandes destinées à l'alimentation humaine. La chaleur est ensuite utilisée pour le traitement des coproduits animaux et la production de PAT et de graisses destinées principalement à l'alimentation des animaux de compagnie et des poissons ainsi qu'à l'oléochimie. La chaleur restante est ensuite utilisée pour le séchage des boues puis le maintien de la température du digesteur de méthanisation.

L'unité de traitement et de recyclage de l'eau épure l'équivalent de 1,4 million de m³ d'eau usée par an. Cela permet de recycler environ 60 % de l'eau utilisée sur le site. Les fractions solides issues de ce traitement sont valorisées principalement pour la production de biogaz, puis d'engrais.

Le dispositif de production de biogaz, en cours d'installation, est constitué de 2 digesteurs et d'un post-digesteur pour un volume total de 15 000 m³. Ils seront approvisionnés pour partie, à raison de 38 000 tonnes, par des solides obtenus par séparation de phase en ferme de déjections porcines à l'aide d'un système innovant de raclage en V. Ceci correspond à la production de 100 000 places d'engraissement (soit 300 000 porcs à l'engrais par an) dans une centaine d'élevages. Le reste de l'approvisionnement du digesteur (73 000 tonnes) proviendra des boues issues du prétraitement des eaux usées de l'abattoir. Après purification le bio méthane sera injecté dans le réseau de GrDF et fournira l'équivalent de 7 MW, soit l'équivalent de 75 % de la consommation de gaz de la ville de Lamballe (12 000 habitants).

La partie solide des digestats est centrifugée puis séchée et pour atteindre 85 % de matière sèche. Cette fraction est ensuite valorisée par une filière de production d'engrais organiques qui produit environ 80 000 tonnes de fertilisants sous forme granulée destinés à la viticulture, à

l'arboriculture, au maraîchage, au jardinage et espaces verts et aux grandes cultures. Ces fertilisants sont transportables sur de longues distances y compris à l'export pour environ 15 %.

L'ensemble du dispositif permet d'augmenter l'efficacité énergétique de l'ensemble de la filière de production de viande de porc en valorisant des déchets pour la production d'énergie thermique, en optimisant l'utilisation de la chaleur produite et son recyclage dans toute une série de processus industriels et en produisant du biogaz valorisé par les populations locales. Ce dispositif permet également un meilleur recyclage des éléments fertilisants et limite les émissions de gaz à effet de serre. Dans les élevages, la séparation de phase permet de récupérer dans la phase solide environ 55 % de l'azote excréteur et 90 % du phosphore. Elle permet également de réduire les émissions d'ammoniac dans le bâtiment d'environ 30 % contribuant ainsi à une meilleure qualité de l'air pour les éleveurs et les animaux, une réduction des émissions vers l'atmosphère et un meilleur recyclage de l'azote. L'exportation de la fraction solide permet à l'éleveur de réduire la charge en N et surtout en P de son exploitation, lui permettant ainsi de mieux raisonner la fertilisation et d'être plus autonome pour son plan d'épandage. Enfin, les fertilisants produits remplacent des fertilisants minéraux, réduisant ainsi les coûts énergétiques de leur fabrication (ammonitrate), l'émission de GES et le recours à des ressources non renouvelables (énergie, phosphate minéraux).

5. Quels leviers d'action pour développer la bioéconomie circulaire

Il existe une diversité importante des territoires d'élevage en France. La répartition très hétérogène du cheptel, de sa composition (ruminants/monogastriques), de l'offre de MPV et de l'usage des sols de la SAU, ainsi que la localisation de l'industrie agroalimentaire amont et aval engendrent une variabilité spatiale importante des flux de bioressources liés à l'élevage. Cette

variabilité de densité animale s'accompagne d'échanges entre régions agricoles en particulier pour l'alimentation des animaux et dans une moindre mesure pour la valorisation des effluents d'élevage.

La concentration géographique des productions animales est observée dans la plupart des pays européens (Roguet *et al.*, 2015) et aussi dans le reste du monde. Elle est favorisée par les nombreux avantages économiques qui en résultent : gains de productivité, économies d'échelle et/ou d'agglomération, développement de compétences. Les normes et incitations environnementales (directive nitrates, Natura, 2000, Règlement communautaire de Développement Rural (RDR), conditionnalité des paiements du 1^{er} pilier...) et les mesures du développement rural (soutiens spécifiques aux agricultures des zones défavorisées) sont des leviers qui peuvent atténuer cette concentration. Leur mise en place a contribué à freiner le développement de l'élevage dans les zones denses sans toutefois être efficace pour le développer dans les autres régions où l'élevage continue à régresser (Roguet *et al.*, 2015).

À partir des éléments exposés ci-dessus, à l'échelle nationale et au niveau des PRA, différentes stratégies de développement de bioéconomie circulaire pourraient être envisagées pour l'élevage :

i) Adapter le cheptel à la disponibilité locale de matières premières. Ceci implique une diminution des cheptels dans les zones très denses et leur redéploiement dans des zones excédentaires en céréales avec peu d'animaux (notamment de l'élevage de monogastriques). Cela nécessite aussi d'adapter la proportion de ruminants et monogastriques à la disponibilité de fourrage et concentré du territoire. Cette stratégie implique également, en plus de la relocalisation de l'élevage, une relocalisation tout au moins partielle de l'appareil amont et aval avec des implications importantes en termes d'emplois associés à l'élevage. Les travaux de Lang *et al.* (2015) indiquent qu'en moyenne pour l'élevage français, chaque emploi direct en élevage

contribue à 1,1 emplois indirects en filière bovin lait, 0,8 en bovin viande, 6,1 en porc, 1,9 en volaille de chair et 1,8 en filière œuf. La question de l'acceptabilité de l'élevage dans les zones céréalières où il a quasiment disparu se pose également.

ii) Adapter les rations en fonction de la disponibilité de MPV locale et nationale. Les ruminants et monogastriques sont de gros consommateurs de tourteaux importés, notamment de tourteau de soja (tableau 1). On peut envisager de favoriser la substitution de ces tourteaux importés par des fourrages ou des matières premières riches en protéines produites localement (colza, tournesol, pois, féverole...). Cette stratégie est également envisageable pour les élevages de monogastriques dans les zones de densité animale modérée. Cependant dans tous les cas cela pose la question de la concurrence entre activités pour l'accès aux surfaces arables. Ceci pourrait impliquer de réduire la production de céréales au profit des cultures plus riches en protéines ou alors d'envisager de nouveaux itinéraires techniques de production de céréales mieux adaptées à l'alimentation animale. Cette stratégie pourrait aussi favoriser la diversité d'assolement et par là, les services écosystémiques.

iii) Favoriser les échanges d'aliments et d'effluents entre PRA. Les échanges sont déjà très importants pour les MPV, notamment pour les concentrés (céréales, tourteaux, coproduits), qui sont transportés sur de longues distances. Ils existent également pour les effluents d'élevages mais de manière beaucoup moins développée. Il convient alors de rechercher des filières de gestion des effluents permettant de reboucler le cycle des nutriments présenté à la figure 2, tout en minimisant les fuites vers l'environnement. La question est de savoir quelle est l'échelle géographique la plus pertinente à la fois d'un point de vue biogéochimique et économique pour reboucler ces cycles (Dourmad *et al.*, 2010). Ceci est envisageable au niveau d'une exploitation seulement si l'on dispose de surfaces d'épandage suffisantes pour valoriser les effluents, ce qui n'est que rarement pour les élevages monogastriques. On peut aussi envisager d'associer plusieurs exploitations voisines

d'une même petite région agricole. L'intérêt de cette approche sur le plan économique et environnemental a été confirmé (Paillat *et al.*, 2009), mais sa mise en place nécessite des concertations entre éleveurs et citoyens pour en favoriser l'acceptabilité locale. La complémentarité entre exploitations d'élevage et exploitations céréalières peut aussi être recherchée à une échelle géographique plus large en produisant des engrais normalisés à partir d'effluents, comme illustré dans l'exemple ci-dessus (figure 10). Ceci nécessite de développer des technologies permettant de réduire le volume d'eau des effluents afin de pouvoir les transporter sur de longues distances. La désodorisation et l'hygiénisation de ces effluents sont également des aspects importants à considérer. Aujourd'hui de nouvelles avancées technologiques permettent de mieux gérer ces flux (méthanisation, compostage, séparation de phase...). La densité des acteurs sur le territoire, la présence ou non de filières agroalimentaires structurées sont aussi des éléments à prendre en compte. Les régions à forte densité animale doivent tirer avantage de la forte densité d'acteurs, de savoir-faire et d'infrastructures pour développer des stratégies de valorisation croisée. En ce sens la production d'énergie par méthanisation et la production d'engrais organiques sont des exemples intéressants. Il y a dans cette perspective des enjeux importants aussi bien en termes d'innovations technologiques qu'en termes d'innovation organisationnelles comme cela est illustré au paragraphe 4 (figure 10).

Conclusion

L'élevage consomme, transforme et fournit de grandes quantités de bioressources dans tous les territoires français. La diversité des espèces animales, des pratiques et des bioressources consommées et produites par l'élevage est un atout pour la bioéconomie. Cependant, les flux existants et leurs déterminants doivent être mieux renseignés pour être pilotés. Pour appuyer le développement de la bioéconomie, la diversité des activités et des bioressources des territoires doit être prise en compte ainsi que les niveaux d'efficacité aux différentes échelles d'organisation.

L'élevage à l'échelle nationale paraît efficace et relativement autonome avec d'une part une consommation importante de fourrages, de coproduits et de concentrés non valorisables par l'Homme et d'autre part la fourniture de biens et services comme des produits animaux à haute valeur nutritionnelle et des effluents avec un fort potentiel fertilisant et de production d'énergie. Cependant à l'échelle des territoires, en fonction des densités animales et des systèmes de production, les situations sont très inégales. Il existe des marges de progrès pour mieux boucler les cycles, améliorer l'autonomie, économiser des intrants et diminuer les pertes vers l'environnement. Plusieurs stratégies peuvent être développées : un re-couplage de l'élevage et de l'agriculture de la ferme au territoire, des échanges de flux intra et inter-territoire entre zone d'élevage et de culture ou entre zone urbaine et rurale, un re-bouclage de flux à l'échelle des systèmes alimentaires.

Les stratégies de rebouclage des cycles, potentiellement très efficaces, présentent de nombreux verrouillages sociotechniques, organisationnels et économiques. On peut mentionner les ressources limitées des acteurs (main-d'œuvre, temps...), le manque de référence technique et de savoir-faire, les coûts logistique et d'investissement, les contraintes réglementaires, l'acceptabilité sociale, la difficile adéquation entre offre et demande du fait d'une grande diversité/hétérogénéité des flux dans le temps et l'espace. La dispersion des activités pose aussi des problèmes de

volume critique à atteindre et de distance limite d'échange. Enfin, l'organisation et la gouvernance de ces flux est un point délicat à résoudre. Les points de verrouillages se traduisent en risques de production et/ou d'approvisionnement. Dans les filières classiques deux modes de gestion sont utilisés pour mettre en adéquation offre et demande : Le marché avec la fixation d'un prix ou la contractualisation entre acteurs. Ces procédures sont difficiles à mettre en place, en effet pour de nombreuses bioressources il n'existe ni marché et ni prix de référence, de plus sans prévisibilité et standardisation des bioressources échangés la contractualisation est délicate. Dans ces conditions, la présence d'un acteur centralisateur/coordonateur, qui prend les décisions mais assume aussi une grande partie des risques est un facteur de réussite important. Les modalités et formes de gestion/coordination doivent s'adapter aux différents contextes territoriaux. Les territoires avec une forte densité animale et des filières très structurées peuvent investir sur le traitement et les échanges de flux intra et interterritoriaux, comme dans l'exemple rapporté à la figure 12. Les filières intégrées peuvent naturellement développer des outils communs de collecte, standardisation, etc., et une gouvernance centralisée des flux de l'amont à l'aval autour d'un acteur coordinateur. Les territoires avec moins d'élevage devront sans doute adopter une stratégie d'intégration agriculture-élevage, d'échange multi-relationnel ponctuel (multiples interactions individuelles sans coordination centralisée).

Le métabolisme territorial, en analysant les flux et stock de matière et d'énergie d'un système et des échanges avec l'environnement permet non seulement de caractériser les différents territoires d'élevage (utilisation des sols, offre de MPV, consommation et rejet des animaux), mais aussi de piloter les flux dans un objectif de durabilité et co-concevoir des systèmes territoriaux innovants. Une analyse multicritère de flux (N, P, K, C...), située dans le temps et l'espace est indispensable pour mettre en adéquation l'offre et la demande de bioressources. La concentration des éléments dans les produits, coproduits et déchets est aussi importante à maîtriser pour calculer des distances d'échange viables. En ce sens des technologies existent pour séparer, concentrer les éléments, stabiliser leur qualité, afin d'augmenter les distances de transport envisageables et ouvrir de nouveaux marchés. Toutes les formes de coordination devront s'appuyer sur une meilleure connaissance des disponibilités et demandes locales de bioressources et des possibilités de leur valorisation. Les acteurs des territoires devront mettre en place une gestion adaptative face aux variations et hétérogénéités des flux. Si les échanges de flux sont insuffisants pour boucler les cycles de nutriments, il sera nécessaire d'organiser la réallocation des activités (élevage, agriculture, outil/infrastructure de collecte biotransformation) en fonction des territoires et des distances d'échange de bioressources.

Références

- Abel J.D., Blanc M., 2017. Vers une bioéconomie durable. Conseil Économique, Social et Environnemental. Les éditions du Journal Officiel de la République Française, 133p. http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2017/2017_08_bioeconomie_durable.pdf
- ADEME, 2014. Agribalyse, référence sur l'impact environnemental des productions agricoles. <http://www.ademe.fr/agribalyse-r>
- ADEME, 2016. Mobilisation de la biomasse agricole. État de l'art et analyse prospective. Ademe, collection expertise, 184p.
- Agreste, 2018. Statistique Agricole Annuelle 2016-2017, répartition du territoire. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2018T1bspca.pdf>
- Animal Task Force, 2016. A strategic research and innovation agenda for a sustainable livestock sector in Europe. Suggested priorities for research for Horizon2020 2018-2020 Work Programme to enhance innovation and sustainability in the livestock production sector of Europe's food supply chains. Second White Paper of the Animal Task Force. 50p.
- Anses, 2017. Troisième étude individuelle nationale des consommations alimentaires (Étude INCA3), avis de l'Anses, rapport d'expertise collective. Anses Édition, 535p.
- Barles S., 2010. Écologies urbaine, industrielle et territoriale. In : Coutard O., Lévy J.P. (Eds). Écologies urbaines, Paris, Economica/Anthropos (collection Villes), 61-83.
- Béline F., Dabert P., Peu P., Girault R., 2010. La méthanisation des effluents d'élevage en France et en Europe : principe, état des lieux et perspectives. Fourrages, 203, 155-161.
- Billen G., Lassaletta L., Garnier J., 2014. A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Glob. Food Sec.*, 3, 209-219.
- Bonaudo T., Bendahan A.B., Sabatier R., Ryschawy J., Magda D., Léger F., Bellon S., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *Eur. J. Agron.*, 57, 43-51.
- Bonaudo T., Billen G., Garnier J., Barataud F., Bognon S., Dupré D., Marty P., 2017. Analyser une transition

agroalimentaire par les flux d'azote : Aussois un cas d'étude du découplage progressif de la production et de la consommation. *Revue d'économie régionale et urbaine*, 5, 967-990.

CE, 2012. Innovating for sustainable growth: A bioeconomy for Europe. *Ind. biotec.*, 8, 57-61. doi.org/10.1089/ind.2012.1508

CE, 2018. A sustainable Bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment. Updated Bioeconomy Strategy. <https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/>

Colonna P., 2013. Le carbone renouvelable au carrefour des enjeux de durabilité. *Innov. Agron.*, 26, 1-15.

Convers B., Prevost P., Viel C., 2018. TRAC, une success story qui a 7 ans. *CAA magazine n°38* (Avril 2018).

Crespel-Darcet, 2016. Biorefinery, organic fertilisation, pet food and other industrial use of animal by products. *Animal Task Force Seminar, 64th Meet. EAAP, Belfast*. <http://www.animaltaskforce.eu/Newsandevents/Events/ATFseminarreport2016.aspx>

D'Amato D., Droste N., Allen B., Kettunen M., Lähtinen K., Korhonen J., Leskinen P., Matthies B.D., Toppinen A., 2017. Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *J. Clean. Prod.*, 168, 716-734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>

Dollé J.B., Faverdin P., Agabriel J., Sauvart D., Klumpp K., 2013. Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production. *Fourrages*, 215, 181-191.

Dourmad J.Y., Levasseur P., Daumer M., Hassouna M., Landrain B., Lemaire N., Loussouarn A., Salaün Y., Espagnol S., 2016. Évaluation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs. *RMT Élevages et Environnement*, Paris, France, 26p.

Dourmad J.Y., Delaby L., Boixadera J., Ortis C., Méda B., Gaigné C., Dumont B., 2017. Diversité des services rendus par les territoires à forte densité d'élevages, trois cas d'étude en Europe. In : Numéro spécial, L'élevage en Europe : une diversité de services et d'impacts. Dumont B. (Ed). *INRA Prod. Anim.*, 30, 303-320.

Dourmad J.Y., Rigolot C., Bonneau M., 2010. Évolution des modes de conduite des élevages porcins et conséquences sur leur charge en effluents. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 75-88.

Dubois O., Gomez San Juan M., 2016. How sustainability is addressed in official bioeconomy strategies at international, national and regional levels. An overview. *FAO, Rome*, 33p.

Dumont B., Fortun-Lamothe L., Joven M., Thomas M., Tichit M., 2013. Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century. *Animal*, 7, 1028-1043.

Ehrenfeld J.R., 2004. Can Industrial Ecology be the 'Science of sustainability'? *J. Ind. Eco.*, 8, 1-3.

GBC, 2015. German Bioeconomy Council. Bioeconomy Policy (Part I): Synopsis and Analysis of Strategies in the G7. http://bioekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/BOER_Laenderstudie_1.pdf

Jouven M., Puillet L., Perrot C., Poméon T., Dominguez J.P., Bonaudo T., Tichit M., 2018. Quels équilibres végétal/animal en France métropolitaine, aux échelles nationale et des « petites régions agricoles ». *INRA Prod. Anim.*, 31, 353-364.

Laisse S., Baumont R., Turini T., Dusart L., Gaudré D., Rouillé B., Benoit M., Rosner P.M., Peyraud J.L., 2017. Efficience alimentaire des élevages : un nouveau regard sur la compétition entre alimentation animale et humaine. *Colloque du GIS Élevage Demain, 17/10/2017, Paris, France*.

Lang A., Dupraz P., Rosner P.M., Tregaro Y., Perrot P., 2015. Les emplois liés à l'élevage dans le Grand Ouest : *GIS Élevage Demain*, 118p.

Langeveld H., Sanders J., Meeusen M., 2012. The biobased economy. Biofuels, materials and chemicals in the post-oil-era. *Erath Scan, Routledge, New York*.

Levasseur P., Lemaire N., 2006. État des lieux du traitement des lisiers de porcs en France. *Tech Porc*, 29, 29-31.

Madelrieux S., Buclet N., Lescoat P., Moraine M., 2017. Caractériser les formes d'interaction entre filières agricoles et territoires : quelles méthodes ? *Cahiers Agricultures*, 26, 24002. <https://doi.org/10.1051/cagri/2017013>

Marouby H., 2016. France : le poids du soja, dépendance et enjeux. *Baromètre porc de l'Ifip, mai 2016*, 8.

Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W., 1972. *The limits to growth*. New York: Universe Books.

Meindersma C., 2007. *Pig05049, 6th Édition*. Flock Ed. 185p.

Paillet J.M., Lopez-Ridaura S., Guerrin F., van der Werf H., Morvan T., Leterme P., 2009. Simulation de la faisabilité d'un plan d'épandage de lisier de porc et conséquences sur les émissions gazeuses au stockage et à l'épandage. *Journ. Rech. Porcine*, 41, 271-276.

Petersen S.O., Sommer S.G., Béline F., Burton C., Dach J., Dourmad J.Y., Leip A., Misselbrook T., Nicholson F., Poulsen H.D., Provolò G., Sorensen P., Vinnerås B., Weiske A., Bernal M.P., Böhm R., Juhász C., Mihelic R., 2007. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livest. Sci.*, 112, 180-191.

Peyraud J.L., Cellier P., Donnars C., Réchauchère O., 2012. In Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres, Paris, France, 68p.

Rapport interministériel, 2016. Une stratégie bioéconomie pour la France, enjeux et vision. Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 35p. <http://agriculture.gouv.fr/telecharger/83595?token=4b2095fafa14f075309cc193dda53d70>

Rouget C., Gaigné C., Chatellier V., Cariou S., Carlier M., Chenut R., Daniel K., Perrot C., 2015. Spécialisation territoriale et concentration des productions animales européennes : état des lieux et facteurs explicatifs. *INRA Prod. Anim.*, 28, 5-22.

SIFCO, 2010. Rapport d'activité SIFCO (Syndicat des Industries Françaises des COproduits animaux), 16p. <https://www.sifco.fr/publications>

Soussana J.F., Lüscher A., 2007. Temperate grasslands and global atmospheric change: a review. *Grass For. Sci.*, 62, 127-134.

Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T., Castel V., Rosales M., de Haan C., 2006. *Livestock's long shadow*, FAO, Rome, Italy, 2006.

Sutton M., Howard C., Erismann J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., van Grinsven H., Grizzetti B., 2011. In *The European nitrogen assessment: sources, effects and policy perspectives*. Cambridge University Press, 660p.

Therond O., Tichit M., Tibi A., Accatino F., Biju-Duval L., Bockstaller C., Bohan D., Bonaudo T., Boval M., Cahuzac E., Casellas E., Chauvel B., Choler P., Constantin J., Cousin I., Daroussin J., David M., Delacote P., Derocles S., De Sousa L., Domingues J.P., Dross C., Duru M., Eugène M., Fontaine C., Garcia B., Geijzendorffer I., Girardin A., Graux A.I., Jouven M., Langlois B., Le Bas C., Le Bissonnais Y., Lelièvre V., Lifrán R., Maigné E., Martin G., Martin R., Martin-Laurent F., Martinet V., McLaughlin O., Meillet A., Mignolet C., Mouchet M., Nozières-Petit M.O., Ostermann O.P., Paracchini M.L., Pellerin S., Peyraud J.L., Petit-Michaut S., Picaut C., Plantureux S., Poméon T., Porcher E., Puech T., Puillet L., Rambonilaza T., Raynal H., Resmond R., Ripoché D., Ruget F., Rulleau B., Rush A., Salles J.M., Sauvart D., Schott C., Tardieu L., 2017. *Volet « écosystèmes agricoles » de l'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques. Rapport d'étude*, Inra, France, 966p.

Thomas M., Fortun-Lamothe L., Jouven M., Tichit M., Gonzalez-Garcia E., Dourmad J.Y., Dumont B., 2014. Agroécologie et écologie industrielle : deux alternatives complémentaires pour les systèmes d'élevage de demain. In : Numéro spécial, *Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ?* Ingrand S., Baumont R. (Éds). *INRA Prod. Anim.*, 27, 89-100.

Weiland P., 2013. Production de biogaz par les exploitations agricoles en Allemagne. *Sciences Eau & Territoires*, 12, 14-23.

Résumé

La bioéconomie se définit comme l'ensemble des activités liées à la production, l'utilisation et la transformation de bioressources pour répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins en énergie et en matériaux de la société, tout en préservant les ressources naturelles et en garantissant la production de services environnementaux. Dans cet article nous décrivons et quantifions les

différents flux de bioressources associés aux activités d'élevage. À l'échelle nationale, les systèmes d'élevage sont les principaux utilisateurs de bioressources (113 Mt) et de surfaces agricoles (55 %), pour l'alimentation des animaux. Ils contribuent largement aux apports alimentaires de l'Homme, principalement en protéines (60 %), lipides (40 %), minéraux et vitamines. Par leur utilisation des surfaces agricoles et la production d'effluents organiques ils contribuent également à la fourniture de services écosystémiques, comme la biodiversité et la fertilité des sols. Les effluents d'élevages représentent environ 19,4 Mt de matière organique correspondant à un potentiel de production de méthane équivalent à 45 TWh d'énergie primaire, très peu valorisé pour le moment. De par son importance, l'élevage constitue donc un facteur majeur d'équilibre ou de perturbation des cycles biogéochimiques, des services écosystémiques et de la biodiversité. Il existe des marges importantes de progrès pour accroître sa contribution à la couverture des besoins humains et mieux boucler les cycles de matières, en améliorant l'autonomie, en économisant des intrants et en diminuant les pertes vers l'environnement. Dans cette perspective, nous discutons les défis et les opportunités d'une meilleure intégration de l'élevage dans la bioéconomie circulaire.

Abstract

Animal production in a circular bioeconomy

Bioeconomy is defined as the set of activities related to the production of bioresources and their utilization and processing to meet human food requirements and contribute to society's needs of energy and materials, while preserving natural resources and ecosystem services. In this paper, we describe and quantify the different flows of bioresources related to animal breeding. At the national level, animal farming systems are the main users of bioresources (113 Mt) and agricultural land (55 %) for animal feeding. They largely contribute to the supply of human food, mainly proteins (60 %), lipids (40 %), minerals and vitamins. Through their utilisation of agricultural land and the production of organic manure, they contribute to the production of ecosystem services, such as biodiversity and soil fertility. The production of animal manure amounts to about 19.4 Mt organic matter corresponding to a potential methane production equivalent to 45 TWh primary energy, with only a minor part of it produced until now. Due to their importance, animal production systems are thus major factors for balancing or disrupting biogeochemical cycles, ecosystem services and biodiversity. Significant margins of progress exist to improve their contribution to meeting human needs, better close nutrient cycles, improve autonomy, and reduce inputs and losses to the environment. With this in mind, we discuss some challenges and opportunities for a better integration of animal production into a circular bioeconomy.

DOURMAD J.-Y., GUILBAUD T., TICHIT M., BONAUDOT., 2019. Les productions animales dans la bioéconomie. In : Numéro spécial. De grands défis et des solutions pour l'élevage. Baumont R. (Éd). INRA Prod. Anim., 32, 205-220.

<https://doi.org/10.20870/productions-animales.2019.32.2.2485>

