

# Intérêts et limites de la méthode du métabolisme territorial pour analyser les flux de matière et d'énergie dans les territoires d'élevage

BONAUDO T. (1), DOMINGUES J.P. (2), TICHIT M. (2), HAUBER GAMEIRO A. (2, 3)

(1) UMR SADAPT, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France

(2) UMR SADAPT, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France

(3) Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia da Universidade de São Paulo, Pirassununga, Brésil

## RESUME

Aujourd'hui, pour maintenir un niveau élevé de production tout en diminuant les impacts environnementaux, il est essentiel de comprendre finement les interactions entre activités d'élevage et flux de matière à l'échelle des exploitations et des territoires. Pour cela, le métabolisme territorial, méthode d'évaluation systémique et multicritère semble prometteuse. Le métabolisme territorial analyse qualitativement et quantitativement le transfert, le stockage et la transformation de matière au sein d'un territoire. Cet inventaire situé dans l'espace et le temps permet donc d'analyser conjointement des processus naturels et techniques. Enfin, en quantifiant l'exploitation des ressources, la production de biens et de déchets, cette méthode permet de calculer simultanément différentes efficacités productives et d'identifier des leviers d'action (substitution, bouclages de cycle, ...). Le métabolisme de l'élevage français, de 1938 à 2010, est analysé pour illustrer l'approche. Il montre que l'augmentation conjointe de la productivité et de l'efficacité de conversion de l'élevage, s'accompagne d'une perte d'autonomie et d'une augmentation des concurrences homme-animal. Les productions de ruminants offrent des avantages clés en termes d'autonomie protéique et de concurrence entre ressources consommables par l'homme.

## Interest and limits of territorial metabolism methods for analyzing the flow of matter and energy in the livestock territories

BONAUDO T. (1), DOMINGUES J.P. (2), TICHIT M. (2), HAUBER GAMEIRO A. (2, 3)

(1) UMR SADAPT, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France

## SUMMARY

Today, to maintain a high level of production while decreasing environmental impacts, it is essential to understand the interactions between livestock and material flow across farms and territories. For this, the socio-ecological metabolism (SEM), a method of systemic assessment and multi-criteria seems promising. The SEM analyzes qualitatively and quantitatively the transfer, storage and material processing within a territory. This inventory located in space and time allows a joint assessment of natural and technical processes. By quantifying resource, production of goods and waste, the SEM method calculates simultaneously different production efficiencies and identifies levers of actions (better closing of the nutrient cycle, input substitution, ...). The SEM of the French livestock sector, from 1938 to 2010 was analyzed to illustrate the approach. It revealed an increased productivity and conversion efficiency of livestock, accompanied by a loss of self-sufficiency and increased feed / food competition. Ruminant productions present key advantages in terms of self-sufficiency and feed/food competition.

## INTRODUCTION

L'élevage, par son empreinte territoriale et ses consommations végétales, est un acteur majeur des cycles biogéochimiques notamment du cycle du carbone et de l'azote. En effet, selon la FAO (2006), le cheptel utilise directement ou indirectement 70% des terres agricoles mondiales. Billen et al., (2014) estiment que plus de 70% de l'azote des cultures agricoles mondiales est destiné à l'alimentation animale. Sutton et al., 2011 (in Billen 2012) estiment ce pourcentage à 80% pour l'Europe. Ces consommations animales engendrent aussi d'importants échanges internationaux, en Europe presque 90% des importations de produits agricoles sont destinés aux animaux (Peyraud et al., 2012). Les animaux, par leur digestion, tendent à découpler le cycle de l'azote et du carbone (couplés lors de la photosynthèse) avec d'une part l'émission d'effluents riches en azote réactif (urée rapidement transformé en ammoniac et nitrate) et d'autre part l'émission de gaz carbonique et de méthane. Les excréments mondiales des animaux sont estimés entre 75 Tg N/an (Smil, 1999) et 111 Tg N/an (Bodirski et al., 2012). Billen et al. (2014) les évaluent à 120 Tg N pour 2009. Ces quantités excrétées sont du même ordre de grandeur que l'utilisation d'engrais de synthèse. Les effluents sont la 2<sup>ème</sup> source d'azote en France avec 1,82 Tg N/an juste derrière les 2,11 Tg N/an d'engrais

(Peyraud et al., 2012). Enfin, l'élevage est un important émetteur de GES avec des estimations de 14,5% à 18% des émissions mondiales (FAO, 2006 ; Gerber et al., 2013).

Cependant dans le même temps, l'élevage favorise la séquestration de carbone dans les prairies permanentes. En Europe la séquestration de carbone des prairies permanentes est de 500 à 1200 kg C/ha/an (Soussana et Lüscher, 2007 ; Schulze et al., 2009 in Dollé et al., 2013). Des études aux Etats-Unis montrent des stockages de 120 à 400 kg C/ha/an, d'autres en Nouvelle-Zélande montrent des stockages de 590 à 900 kg C/ha/an (Pelletier et al., 2010 ; Mudge et al., 2011 in Dollé et al., 2013). Les prairies ont donc un rôle primordial à jouer dans l'initiative « 4 pour 1000 », qui vise à augmenter la séquestration de carbone 0,4%/an pour compenser l'augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. L'élevage dans sa complexité et diversité peut être dans le même temps, émetteur de GES et puits de carbone, responsable de pollutions par les nitrates et facteur essentiel de maintien de fertilité. En fonction de ses caractéristiques biotechniques, de son utilisation des sols, ... l'élevage peut être un facteur majeur d'équilibre ou de perturbation des cycles biogéochimiques.

Aujourd'hui, pour maintenir un niveau élevé de production tout en diminuant les impacts environnementaux, il est essentiel de comprendre finement la façon dont les systèmes

d'élevage influent sur les flux de matière à l'échelle des exploitations et des territoires. Il est important d'analyser conjointement les caractéristiques biotechniques des systèmes d'élevage, les utilisations des sols et les efficacités productives et environnementales. Pour cela, il nous faut mobiliser de nouveaux concepts et outils d'analyse systémique et multicritère. Un concept, l'écologie territoriale, et une méthode, le métabolisme territorial semblent prometteurs pour avancer dans cette direction. L'objectif de cet article est d'amorcer un inventaire des intérêts et limites du métabolisme territorial pour analyser les systèmes d'élevage au sein des territoires. Pour cela, cet article présente d'une part, un état de l'art analysant les bases conceptuelles du métabolisme territorial et ses applications dans le domaine de l'élevage, et d'autre part, une étude de cas, à titre illustratif, du métabolisme territorial de l'élevage en France de 1938 à 2010.

## 1. MATERIEL ET METHODES

Pour calculer le métabolisme de l'élevage en France, nous utilisons les statistiques agricoles de 1938 (Cavailhes *et al.*, 1987) et de 2010 (Recensement agricole 2010). Cavailhes *et al.* (2010) ont analysé les définitions, les nomenclatures et les données statistiques de 1938 pour qu'elles soient comparables aux statistiques et méthodes de calcul actuelles. Ce travail concerne notamment les productions animales avec la composition des troupeaux et le rapport Tête/UGB pour prendre en compte l'accroissement de taille des animaux au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Les données mobilisées dans notre étude sont i) les cheptels moyens annuels exprimés en UGB (bovin, ovin, caprin, porc, volailles et lapin), ii) les productions animales (lait, viande, œuf), iii) les surfaces et productions végétales destinées à l'alimentation animale (prairies, fourrages, céréales, oléo-protéagineux) (Domingues *et al.*, 2015). Il est essentiel d'unifier tous les flux (intrants, produits et coproduits, déchets et effluents) en une unité commune pour pouvoir les comparer. Nous avons donc choisi de les exprimer en unité d'azote. L'azote est un bon indicateur du fonctionnement des systèmes alimentaires, de ses composantes techniques et de ses relations au territoire et à l'environnement (Billen *et al.*, 2014). Pour modéliser les flux d'azote, nous nous appuyons sur la méthodologie GRAFS (Generic Representation of Agro-Food Systems) proposée par Billen *et al.* (2014), et les coefficients d'azote contenu dans chaque flux de matière. Nous utilisons la méthodologie détaillée par Lassaletta *et al.*, 2014a-b.

Nous calculons différents indicateurs de performance, i) indicateurs d'intensité de l'élevage (production en kg d'azote par ha ou par UGB et intrant en kg d'azote par ha ou par UGB), ii) indicateur d'efficacité des productions animales (kg d'azote végétal consommé par kg d'azote produit en carcasse animal), iii) un indicateur d'autonomie du système (% d'azote importé sur azote total intrant) et enfin iv) un indicateur de compétition entre alimentation humaine et animale (en calculant combien d'azote directement consommable par l'homme est utilisé pour produire un kg d'azote animal).

## 2. RESULTATS

### 2.1. BASES CONCEPTUELLES DU METABOLISME TERRITORIAL ET PRINCIPALES APPLICATIONS

#### 2.1.1. L'Écologie territoriale comme cadre conceptuel

L'écologie territoriale est née d'une réflexion sur la nécessité d'un bouclage des cycles pour améliorer les performances environnementales et économiques. Son ambition est de mieux comprendre les interactions entre société et environnement en étudiant les flux de matière et d'énergie mobilisés par les systèmes anthropiques comme les villes, les industries ou les territoires (Barles, 2010). En plus de

l'analyse des flux de matière et d'énergie, qui permettent à un territoire de se développer, de maintenir de l'emploi et de créer richesses, l'écologie territoriale analyse l'inscription spatiale et la gouvernance de ces flux. L'ensemble des secteurs d'activité du territoire est pris en compte, leur dimension matérielle (ou biophysique) mais aussi sociales, économiques. En cela la vision holiste de l'écologie territoriale rejoint les définitions classiques du territoire, associant une dimension biophysique, une dimension organisationnelle et une dimension identitaire (Laganier *et al.*, 2002). « Un territoire est l'appropriation consciente d'un espace par un ensemble d'acteurs, qui l'exploite et le transforme » (Brunet, 1998). Pour cela les acteurs mettent en place des règles d'accès aux ressources, des relations de subordination ou de complémentarité. L'écologie territoriale analyse le fonctionnement territorial, avec une approche interdisciplinaire, qui combine l'analyse des flux de matière et leurs impacts environnementaux empruntés aux sciences biotechniques (écologie, bio-géochimie, agronomie, ...), et l'analyse de la gouvernance de ces flux et leur inscription spatiale étudiés par les sciences humaines (sciences de gestion, économie, géographie, ...).

#### 2.1.2. Le métabolisme territorial comme mise en pratique du concept d'écologie territoriale

Dans son article de référence « The metabolism of cities » Wolman (1965) introduit la notion de métabolisme en définissant des besoins métaboliques des villes (en énergie, en matériel, en nourriture)... Pour lui cette analogie au vivant est utile pour comprendre les impacts des activités urbaines sur elles mêmes et leur hinterland. Pour se maintenir et fournir des biens et services, les systèmes anthropiques mobilisent, transforment, transportent, stockent des ressources matérielles et immatérielles mais aussi rejettent des déchets. L'analyse des processus biophysiques de synthèse et de dégradation (anabolisme et catabolisme) est essentielle pour comprendre et piloter ce système. Le métabolisme concerne l'analyse quantitative et qualitative des flux et stocks de matière à l'intérieur d'un système, et des échanges avec l'environnement. Cet inventaire, situé dans l'espace et le temps, permet d'analyser conjointement des processus naturels et techniques. En quantifiant l'exploitation des ressources, la production de biens et de déchets, cette méthode permet de calculer simultanément différentes efficacités productives et identifier des leviers d'action (substitution, bouclages de cycle, ...).

#### 2.1.3. Le métabolisme territorial se décline en plusieurs méthodes et échelles spatiales et temporelles

Toutes les méthodes se basent sur la loi de conservation de masse de Lavoisier : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme », soit  $\text{Intrants} - \text{Produits} + \text{Variation de stock} = 0$ . L'expression des flux se fait en général sur une base annuelle et des trajectoires peuvent être reconstruites avec plusieurs années de références. Les études sont menées à différentes échelles d'organisation plus ou moins emboîtées, des systèmes d'élevage à l'échelle communale (Bonaudo *et al.*, 2015), de l'échelle départementale à l'échelle nationale (Bonaudo *et al.*, 2015, Le Noë *et al.*, 2015, Chatzimpiros *et Barles*, 2010), de l'échelle régionale à l'échelle mondiale (Billen *et al.*, 2010, 2014, 2015). Deux méthodes sont principalement utilisées l'analyse de flux de matière brute (combustibles fossiles, minerais et métaux, matériaux de construction, ...) et l'analyse de flux de substance (carbone, azote, ...). L'analyse de flux de matière permet de comprendre la nature et de l'intensité des besoins matériels d'un territoire (par catégorie de ressource et secteur d'activité). Cette méthode suit une logique de comptabilité nationale ce qui permet une bonne disponibilité des données. Une des limites est de ne pas avoir d'additivité complète des matières de nature différente. Elle ne permet pas non plus d'analyse fine des impacts sur les milieux et les cycles biogéochimiques.

L'analyse de flux de substance décrit la mobilisation d'une substance précise par une activité et la circulation dans les compartiments environnementaux et territoires. Cela permet de mesurer précisément la contribution d'un territoire et de l'agencement de ces activités à un problème environnemental spécifique comme par exemple les pollutions diffuses de nitrates, le réchauffement climatique, ... En convertissant les matières en un seul de leur composant, on peut agréger et comparer les flux entre activités et entre compartiments environnementaux. Le point délicat est le choix de l'élément reflétant le mieux les activités et flux d'un territoire. Il peut être nécessaire considérer plusieurs éléments. De nombreuses études de flux de substance sont menées pour analyser les systèmes alimentaires et plus particulièrement le rôle de l'élevage dans un territoire et l'importance de la proportion de protéines animales dans les régimes alimentaires. Certains études allient à l'étude des flux une analyse d'aires et distances d'approvisionnement. La plupart des études des systèmes alimentaires expriment les flux en équivalent azote, cela permet d'appréhender conjointement les productions végétales et animales, mais aussi les apports d'intrants sous forme d'engrais (minéraux et organiques), d'alimentation animale importée, ou encore la fixation et les dépôts atmosphériques d'azote. La méthode de représentation GRAFS (Generic Representation of Agro-Food Systems) représente l'ensemble de ces éléments avec les différentes utilisations du sol associées à l'élevage ou à l'agriculture (Billen et al. 2014, 2015). Ce formalisme est donc adapté pour représenter l'importante de l'élevage dans le fonctionnement d'un territoire.

Toutes les études montrent l'importance de l'élevage dans le cycle de l'azote aussi bien pour sa faculté à excréter de l'azote labile après digestion de ressources végétales locales et importées engendrant des surplus d'azote. Selon Billen et al. (2014) 25% de l'azote des cultures utilisées pour l'alimentation animale voyage internationalement. De manière plus large, on remarque une ouverture des flux accompagné par la spécialisation des territoires (Billen et al., 2012, Bonaudo et al., 2015). Prenant l'ensemble du système alimentaire, ces études permettent d'identifier des concurrences entre alimentation humaine et animale. Billen et al. (2012) estiment que 36 à 40% de l'azote des cultures des terres arables sont destinées à l'alimentation animale. Ces études montrent aussi une extrême variabilité des productivités des systèmes d'élevage, de leur autonomie et de leur efficacité. Ceci étant la résultante de choix techniques et de conditions naturelles. Billen et al. (2014), identifient des zones très excédentaires et autonomes (Amérique latine, Australie, Nouvelles Zélande, ...), d'autres importatrices comme la Chine, Asie du Sud Est, le Maghreb et le Moyen Orient (importatrice d'alimentation animale et de produits animaux). L'efficacité de conversion des protéines végétales en protéines animales est très variable de 2,4% en Afrique à 16-17% pour l'Europe et l'Amérique du nord. Ceci reflète l'intensité des productions et la proportion entre monogastriques et ruminants des cheptels. Les ruminants étant en général peu efficace, mais plus autonome et avec peu de concurrence avec l'homme. On retrouve aussi des études sur le cycle du Phosphore (Bouwman et al., 2009, Van Drecht et al., 2009). Enfin de manière plus rare, il existe des études analysant conjointement de flux de nature très différentes, par exemple des flux d'azote avec des flux d'argent mobilisés par des systèmes d'élevage (Bonaudo et al., 2015). Enfin, généralement l'élevage est une composante relativement peu détaillée dans les études.

## 2.2. L'ETUDE DE CAS : LE METABOLISME TERRITORIALE DE LA FRANCE DE 1938 A 2010

De 1938 à 2010, alors que la SFP et la STH ont diminué respectivement de 33% et 47% (tableau 1), le cheptel a augmenté de 18 à 26 million d'UGB. Les densités animales

ont augmenté de 59% en UGB/SAU et de 120% en UGB/SFP.

Les productions animales ont doublé passant de 0,139 Tg N/an à 0,279 Tg N/an (tableau 2). Les productions de ruminants sont passées de 0,107 Tg N/an à 0,178 Tg N/an, ce qui correspond à une augmentation de productivité de 7,2 à 9,4 kg N/UGB/an. Cette augmentation de productivité des ruminants est principalement portée par la production laitière. Le lait est la plus importante production avec 51% du total de l'azote animal produit en 1934 et 46% en 2010. Cependant la contribution des ruminants aux productions animales totales a reculé passant de 78% à 64%. Les productions monogastriques ont augmenté fortement passant de 22% de l'azote total produit en 1938 à 36% en 2010.

Cette intensification des productions s'accompagne d'une utilisation massive de concentré, passant de 29% de l'azote de la ration à 58%. La part des céréales et des coproduits dans l'alimentation animale a aussi fortement augmenté de 1938 à 2010. Les céréales et coproduits représentaient respectivement 15,7 et 6,9% des apports d'azote dans les rations en 1938 pour 20% et 34,3% en 2010.

Nous avons aussi mis en évidence une forte augmentation des importations, en 1938, l'élevage français importait l'équivalent de 56.000 t d'azote principalement sous forme de riz, maïs, orge et tourteaux, alors qu'en 2010 il importait 380.000 t d'azote principalement de tourteau de soja (68%).

Nous analysons trois indicateurs d'efficacité productive. L'efficacité de conversion de l'azote végétal en azote animal s'est améliorée passant de 14,6% à 17,3% en 2010. Le second indice est l'autonomie protéique, qui diminue passant de 94% à 77%. Le dernier indice évalue la compétition entre l'alimentation animale et humaine, en 1938 on utilisait 1 kg d'azote végétal consommable par l'homme pour produire 1 kg d'azote animal, on en utilise aujourd'hui 1,24 kg. Les évolutions des caractéristiques du métabolisme sont liées à l'évolution de la matrice productive avec une importance croissante des productions monogastriques. Le cheptel monogastrique a été multiplié par 2 et ses productions par 3.

**Tableau 1** Evolution des surfaces agricoles et des productions végétales pour l'alimentation animale

	1938		2010	
	Million ha	Production (Tg N)	Million ha	Production (Tg N)
SAU (ha)	31,3		28,9	
SFP (ha)	18,8		12,5	
STH (ha)	11,7		6,2	
Importations tourteaux	-	0,056	-	0,379
<i>Dont soja</i>	-	-	-	0,257

**Tableau 2** Evolution des cheptels et des productions animales

	1938	2010
Cheptel total (Million d'UGB)	18,065	26,462
<i>dont herbivores</i>	14,773	18,873
<i>dont granivore</i>	3,292	7,588
Production (Tg N)	0,139	0,279
<i>Gros bovins</i>	0,024	0,041
<i>Veau</i>	0,011	0,006
<i>Ovins-caprins</i>	0,002	0,003
<i>Porcins</i>	0,019	0,048
<i>Volailles et lapins</i>	0,008	0,037
<i>Œufs</i>	0,006	0,016
<i>Lait</i>	0,071	0,128

## CONCLUSION

Notre étude du métabolisme territoriale de la France de 1938 à 2010 montre l'augmentation conjointe de la productivité et de l'efficacité de conversion de l'azote végétal en azote animal, s'accompagnant d'une perte d'autonomie et d'une augmentation des concurrences homme-animal. Les productions de ruminants restent largement dominantes, autonomes et peu concurrentes de l'homme. Il faut noter que les résultats à l'échelle nationale masquent des hétérogénéités locales fortes.

Le métabolisme territorial permet une analyse conjointe des productions animales et végétales, des apports d'intrants (fertilisant, alimentation) et des pertes vers l'environnement. Il permet d'explicitier et quantifier le lien entre cycles biotechniques et les choix biotechniques (système d'alimentation, proportion monogastrique et ruminant, productivité, ...), aussi bien à l'échelle intra-exploitation, qu'inter-exploitation (territoriale et filière), et inter-sectoriel. En cela, cette méthode permet de comprendre et de quantifier l'intégration de l'élevage et de ses filières dans le territoire. Elle permet d'objectiver les rôles de l'élevage dans le territoire. Cette méthodologie permet une analyse systémique (de l'assiette à la fourche), multicritères (avec les éléments N, C, P, voir même flux monétaire, ...), pluri-échelle (système d'élevage, ferme, territoire), située dans le temps et l'espace. Cette méthode articule système Agro-alimentaire et Territoire permet de visualiser des arbitrages entre éléments, entre différents critères d'efficacité, entre échelles d'organisations. Afin d'appréhender pleinement la diversité des systèmes d'élevage et leur l'importance dans le fonctionnement des territoires trois défis restent à relever : (i) la constitution de bases de données sur les systèmes d'élevage à plusieurs échelles d'organisation, (ii) la multiplication d'étude de cas alliant plusieurs éléments biochimiques et indicateurs socio-économiques, ce qui nous amène à (iii) un besoin de recherche pour relier métabolisme territoriale et services écosystémiques.

- Barles, S.** 2010. *Journal of Environmental Planning and Management*, 53, 439–455
- Billen, G., Beusen, A., Bouwman, L., Garnier J.** 2010. *Global Biogeochemical Cycles*, 24, 12p
- Billen, G., Garnier, J., Lassaletta, L.** 2014. *Glob. Food Security*, 3, 209–219
- Billen, G., Lassaletta, L., Garnier, J.** 2015. *Environ. Res. Lett.*, 10, 15p
- Bodirsky, B.L., Popp, A., Weindl, I., Dietrich, J.P., Rolinski, S., Scheffele, L., Schmitz, C., Lotze-Campen, H.** 2012. *Biogeosciences*, 9, 4169–4197
- Bonaudo, T., Billen, G., Garnier, J., Barataud, F., Bognon, S., Marty, P., Dupré, D.** 2015. In Buclet (editor), *Essai d'écologie territoriale*. Paris, 161-182
- Bouwman, A.F., Beusen, A., Billen, G.** 2009. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, 16p
- Brunet, R., Ferras, R., Théry, H.** 1998. *Les mots de la géographie. Dictionnaire critique. La Documentation Française* (édité), Montpellier, 518p
- Cavailles, J., Bonnemaire, J., Raichon, C., Delamarque, F.** 1987. *Caractères régionaux de l'histoire de l'élevage en France. Méthodographie et résultats statistiques 1938-1980*. Versailles, 636p
- Chatzimpiros, P., Barles, S.** 2010. *Sci Total Environ*, 408, 4644–4653
- Dollé, J.B., Faverdin, P., Agabriel, J., Sauvart D., Klumpp, K.** 2013. *Fourrages* 215, 181-191
- Domingues, J.P., Bonaudo, T., Gabrielle, B., Tichit, M.** 2015. *European Federation of Animal Science*, 66, 1p
- FAO, 2006.** In *FAO, Livestock's Long Shadow environmental issues and options*, Rome, 3-6

- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G.** 2013. In *Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. FAO, Rome, 115p
- Laganier, R., Villalba, B., Zuindeau, B.** 2002. *Développement durable et territoires*, dossier 1, 16p
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., Garnier, J.** 2014 a. *Environ. Res. Lett.*, 9, 105011
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Garnier, J., Leach, A.M., Galloway, J.N.** 2014 b. *Biogeochemistry*, 118, 225–41
- Le Noë, J., Billen, G., Lassaletta, L., Silvestre, M., Garnier, J.** 2016. *Cah. Agric.*, 25, 14p
- Mudge, P.L., Wallace, D.F., Rutledge, S., Campbell, D.I., Schipper, L.A., Hosking, C.L.** 2011. *Agric., Ecosystems And Env.*, 144, 271-280
- Pelletier, N., Pirog, R., Rasmussen, R.** 2010. *Agric. Syst.*, 103, 380-389
- Peyraud, J.L., Cellier, P., Donnars, C., Réchauchère, O., (coord.)** 2012. In *Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres*, Paris, 68p
- Schulze, E.D., Luysaert, S., Ciais, P., Freibauer, A., Janssens, I.A., Soussana, J.F., Smith, P., Grace, J., Levin, I., Thiruchittampalam, B., Heimann, M., Dolman, A.J., Valentini, R., Bousquet, P., Peylin, P., Peters, W., Rodenbeck, C., Etiope, G., Vuichard, N., Wattenbach, M., Nabuurs, G.J., Poussi, Z., Nieschulze, J., Gash, J.H.** 2009. *Nature Geoscience*, 2, 842-850
- Smil, V.,** 1999. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 647-662
- Soussana, J.F., Lüscher, A.** 2007. *Grass and Forage Science*, 62, 127-134
- Sutton, M., Howard, C., Erisman, 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
- Van Drecht, G., Bouwman, A.F., Harrison, J., Knoop J.M.** 2009. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, 19p
- Wolman, A.** 1965. *Scientific American*, 213, 179-190