

Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France

Academic Notes of the French Academy of agriculture

Authors:

Gilles Lemaire

Title :

L'intégration des cultures et de l'élevage des herbivores reste la base d'une agriculture à la fois productive et durable/Crop-herbivore livestock integration systems as the basis for an agriculture both productive and sustainable

Year :

2023. Volume 16. Number 11. pp. 1-18

Published online:

11 December 2023.

<https://doi.org/10.58630/pubac.not.a667071>

[L'intégration des cultures et de l'élevage des herbivores reste la base d'une agriculture à la fois productive et durable/Crop-herbivore livestock integration systems as the basis for an agriculture both productive and sustainable](#) © 2023 by Gilles Lemaire is licensed under [Attribution 4.0](#)

International 

L'intégration entre cultures et élevage des herbivores reste la base d'une agriculture à la fois productive et durable

Crop-herbivore livestock integration systems remains the basis for a productive and sustainable agriculture

Gilles Lemaire

¹ Directeur de recherche honoraire INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France

Correspondance :
gilles.lemaire.inra@gmail.com

Résumé

La nécessité de l'association agriculture-élevage a été remise en cause à partir des années 1950 du fait de la mécanisation et de l'utilisation des engrais et des pesticides. Cette évolution a été accompagnée d'une simplification des systèmes de production, de transformation et de distribution des denrées agricoles. Les exploitations agricoles se sont spécialisées entraînant une séparation entre productions végétale et animale, une simplification des rotations, plus de monoculture et d'homogénéité des paysages. Cette hyperspécialisation territoriale provoque des dégâts environnementaux non acceptables. Il importe donc de retrouver un équilibre local entre productions animale et céréaliculture. La diversification des rotations qui en résulte permet

alors de diminuer la pression des adventices, des maladies et ravageurs des cultures, réduisant ainsi l'usage des pesticides, et de recycler des éléments nutritifs du sol en diminuant le recours aux engrais de synthèse.

Abstract

The necessity of crop-livestock integration has been questioned since 1950s by increasing mechanization power, fertilizer and pesticide use and by the huge simplification of agriculture production, transformation and food distribution systems. Farms became more specialized: separation of cropping from livestock production, crop rotation simplification and mono-cultures, leading then to homogeneity of landscapes.

Such a hyperspecialisation at territory level leads nowadays to unacceptable environmental impacts. It is then necessary to restore an equilibrium between cropping and livestock system at local scale. The resulting diversification of cropping rotations should allow the decrease in pressure of weeds and plant diseases and insects, leading to a decrease in pesticide use, and the increase in mineral nutrient recycling and a corresponding reduction of external fertilizer use.

Mots clés

herbivores domestiques, prairies, cycles biogéochimiques, fertilisation minérale.

Keywords

domestic herbivores, grasslands, biogeochemical cycles, mineral fertilization.

1. L'association entre cultures céréalières et élevage des herbivores a été la base des agrosystèmes

Depuis son origine, l'agriculture n'a pu se développer que grâce à des transferts d'éléments minéraux : l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K) et les autres macro-éléments (calcium, Ca ; magnésium, Mg ; soufre, S), ainsi que l'ensemble des micro- et oligo-éléments indispensables à la synthèse de la biomasse des plantes, assurant le couplage des cycles biogéochimiques de ces éléments minéraux avec celui du carbone (C), grâce à l'autotrophie des végétaux chlorophylliens. Les herbivores, en consommant une partie de la biomasse primaire, jouent le rôle de niveau trophique secondaire. Ainsi ils permettent, par leur digestion et leurs déjections, une accélération du recyclage des nutriments minéraux au profit des micro-organismes et des chaînes trophiques hétérotrophes du sol, qui peuvent ainsi remettre ces nutriments à disposition des plantes sous une forme assimilable (Lemaire *et al.*, 2023). Ainsi, dès le Néolithique, à l'exception des vallées du Nil

et de la Mésopotamie, où les limons des crues assuraient le transfert des nutriments minéraux dans tout un bassin alluvial, la fertilité des sols agricoles, a été assurée par l'Homme, grâce aux transferts liés à l'élevage des herbivores domestiques, à partir des écosystèmes forestiers, des savanes, des steppes ou des prairies naturelles vers les zones mises en culture (Mazoyer et Roudart, 1997). La capacité de l'agriculture à nourrir des populations humaines de moins en moins rurales n'a fait qu'augmenter, en raison du chargement animal qui lui était associé et de l'efficacité technique mise en œuvre pour optimiser ces transferts de fertilité.

L'association entre agriculture et élevage a atteint sa pleine efficacité lors de la première révolution agricole du XVI^e siècle en Europe. La généralisation de la rotation triennale des cultures, dite de Norfolk en Grande-Bretagne (Riches, 1967), a consisté à introduire des prairies temporaires, avec des légumineuses, pâturées par des herbivores domestiques dans les assolements céréalières, en remplacement de la jachère traditionnelle. Cette introduction a permis de passer d'un rendement moyen du blé qui stagnait à 10 qx/ha depuis l'époque romaine à des rendements de 20 qx/ha, favorisant l'essor économique de la Renaissance dans toute l'Europe (Mazoyer et Roudart, 1997). L'adage de Sully « Labourage et pâturage sont les deux mamelles dont la France est alimentée. » fut en son temps un mot d'ordre porteur de progrès agronomique.

2. Rôle des herbivores et des prairies pour la régulation des cycles biogéochimiques C, N et P dans les agrosystèmes

Les cycles du carbone de l'azote et du phosphore, éléments constitutifs des plantes et de la biosphère, ainsi que les autres éléments minéraux indispensables aux êtres vivants, sont à la base du fonctionnement des écosystèmes terrestres. On les nomme « cycles biogéochimiques » pour montrer que ces éléments passent d'une forme « biologique », où



Figure 1. Les herbivores domestiques : des émetteurs de méthane ? Oui, mais aussi des régulateurs des cycles de C, N et P dans les agro-écosystèmes.

ils sont couplés entre eux et avec du C au sein de molécules organiques, vers des formes minérales, où ils sont dissociés et peuvent circuler dans les sols en solution avec l'eau ou dans l'atmosphère sous forme de gaz.

Les prairies, comme l'ensemble des écosystèmes terrestres à base de végétation pérenne, permettent un couplage constant des cycles de C, N et P (ainsi que des autres minéraux), du fait de la photosynthèse, qui absorbe le CO₂ atmosphérique, et de l'absorption et de l'assimilation de N et du P minéral du sol pour synthétiser la biomasse végétale. Le découplage de C-N et P se réalise lors de la minéralisation de

la matière organique accumulée dans le sol par les micro-organismes, qui libèrent ainsi du CO₂ dans l'atmosphère et des formes solubles de N et P qui sont à nouveau assimilables par les plantes. Ainsi se réalise un couplage-découplage-recouplage des cycles C-N-P avec très peu de fuites, restant donc très conservatif. L'animal, en pâturant et digérant l'herbe ingérée, contribue à accélérer le découplage C-N et P et sa remise à disposition de la végétation par ses déjections. La productivité de la prairie est liée à la vitesse du flux de couplage-recouplage C-N-P. Cette vitesse est liée à l'entrée de N dans le système, ce qui dépend avant tout de la

présence des légumineuses fixatrices du N_2 atmosphérique dans la végétation. Cet écosystème « prairie-herbivore » reste donc parfaitement résilient tant que le chargement animal, c'est-à-dire le nombre d'animaux par hectare, qui représente la capacité de découplage C-N-P, n'est pas excessif par rapport à la capacité de recouplage par la végétation et le microbiome du sol (Soussana et Lemaire, 2014). Lorsque l'on dépasse ce seuil de chargement à l'échelle d'un territoire, l'excès de découplage entraîne une circulation importante des formes actives de N (nitrates NO_3^-) et P dans le milieu ; ces formes deviennent alors source de pollution des eaux et de l'air (émission de protoxyde d'azote, N_2O , dans l'atmosphère, puissant gaz à effet de serre).

Dans les écosystèmes dits « naturels », telles les prairies ou les forêts, les interactions de la végétation et des communautés microbiennes du sol permettent un couplage étroit entre les cycles de C et de N grâce aux processus de la photosynthèse et de la nutrition azotée des plantes. Ce couplage s'opère aussi dans le sol, à travers la dynamique des matières organiques et la capacité des micro-organismes à réorganiser l'azote minéral libéré par la minéralisation. Ainsi les flux de N dans l'écosystème sont liés aux flux de C, ce qui évite l'accumulation des formes minérales de N (nitrique et ammoniacale) et réduit les risques d'émissions du N_2O vers l'atmosphère, en même temps qu'est réduit le passage, vers l'hydrosphère, des nitrates, responsables de la détérioration de la qualité des eaux. La répartition relative de C entre l'atmosphère (sous forme de CO_2 et de CH_4) et la biosphère continentale (sous forme de biomasse organique) dépend à terme du temps de résidence de C dans chacun de ces deux compartiments (Parsons *et al.*, 2011). Le temps moyen de résidence du C incorporé au sol sous forme de matière organique (racines mortes, litières végétales, etc.) est, en général, assez bref : en trois ans, 90 % du C est minéralisé par les communautés microbiennes (Berthelin *et al.*, 2022) et retourne vers l'atmosphère sous forme de CO_2 . Les 10 % du C restant s'accumulent sur des temps plus longs, donnant ainsi aux prairies une certaine capacité à séquestrer le C.

Cette séquestration de C est associée à une forte

rétenion de N, ce qui évite ainsi les émissions de cet élément vers l'atmosphère et vers l'hydrosphère. Cela confère aux prairies une forte valeur environnementale. La biodiversité hébergée par les prairies, tant au niveau de la végétation herbacée qu'au niveau des communautés microbienne et animale du sol, contribue à la régulation et à la stabilité de ces fonctions de couplage C-N et de leurs conséquences environnementales bénéfiques.

Les bénéfices environnementaux des prairies peuvent cependant s'amenuiser avec leur intensification. En effet, ce dernier phénomène résulte de deux processus : (1) une augmentation de la production d'herbe grâce à des apports d'éléments fertilisants ; et (2) une augmentation du chargement animal, permettant d'utiliser efficacement le supplément d'herbe produite. L'augmentation de la production d'herbe par des apports de N ou de P permet d'accroître la photosynthèse et, donc, l'entrée de C dans le système, conformément au couplage C-N-P, tant que les apports de N ne sont pas excédentaires par rapport aux besoins liés aux capacités de croissance de la prairie. Le système « prairie » reste donc en lui-même très conservatif grâce à ce couplage C-N-P.

Cependant l'augmentation du chargement animal, consécutive à l'augmentation de production d'herbe, a deux conséquences majeures : (1) le découplage de C-N-P par l'animal (digestion), avec émissions de CO_2 et CH_4 par l'animal, et la concentration de N sur les « pissats » (urines) ; et (2) une réduction du flux de C vers le sol, en provenance des litières foliaires, suite à la défoliation augmentée par le pâturage (Soussana et Lemaire, 2014). Il en résulte que la prairie, au-delà d'un certain niveau de chargement, ne peut plus assurer le couplage total de C-N, et les formes minérales de N peuvent s'accumuler dans le sol. Ainsi les risques de lixiviation de nitrates augmentent exponentiellement avec le chargement animal et sont relativement indépendants, à chargement équivalent, de l'origine du N entrant dans le système, *via* la fertilisation ou *via* la fixation symbiotique des légumineuses (Ledgard *et al.*, 2009). Il en va de même pour les risques

d'émissions de N_2O (Flechard *et al.*, 2005). Ainsi comme l'ont montré Soussana et Lemaire (2014), la capacité maximale de séquestration de C d'une prairie est obtenue pour des niveaux modérés d'intensification.

Il faut donc déterminer, pour chaque prairie particulière, son niveau d'intensification optimum, au-delà duquel les suppléments de production animale encore possibles sont accompagnés de risques environnementaux accrus. En revanche, tant que ce niveau d'intensification optimum n'est pas atteint, l'introduction des prairies au sein des rotations de cultures arables, dans des exploitations mixtes agriculture-élevage permet d'obtenir une plus grande sécurité vis-à-vis des risques environnementaux.

Une solution pour maximiser la production de produits animaux par hectare de prairie pourrait être une exploitation en fauche et un élevage des animaux à l'étable, alimentés par l'herbe récoltée et stockée. Cela permet en effet de maximiser la production d'herbe tout en minimisant les impacts environnementaux à l'unité de surface de sol, puisque le découplage C-N-P par l'animal se produit alors à l'étable. Une telle solution impose une maîtrise de la chaîne de récolte, de fanage et de conservation du fourrage, afin de conserver la valeur alimentaire de ce dernier. Toutefois le problème est alors reporté au niveau des bâtiments d'élevage et de la chaîne de traitement des déjections animales. Cette solution permet néanmoins une réintroduction de C, par l'intermédiaire des pailles de céréales, pour résorber les excédents de N dans les déjections animales produites à l'étable. Ainsi un recouplage C-N grâce à une chaîne de traitement des fumiers (compostage, méthanisation) et une réincorporation de matières organiques sous des formes relativement stabilisées dans les sols cultivés permettent une meilleure valorisation de C, une diminution des risques d'émissions de N et un plus long temps de résidence de C dans les sols.

Pour mettre en place un tel système, on doit associer étroitement un atelier d'élevage avec un système de cultures annuelles qui fournit à la fois les ressources en paille et les surfaces d'épandage des déjections animales. La valeur

environnementale d'un tel système intégré doit donc s'évaluer globalement, en prenant en compte l'ensemble des impacts indirects induits par l'utilisation des intrants. Les contraintes en termes de temps et de pénibilité du travail doivent aussi être prises en compte.

La mise en culture des sols de prairies, avec ou sans labour, en interrompant le flux entrant de C du fait de périodes plus ou moins longues de sol nu, provoque un fort découplage C-N. Ce dernier est accompagné par une augmentation des pertes de CO_2 dans l'atmosphère et une accumulation d'azote minéral dans le sol qui augmente les risques de pertes gazeuses (émissions de NH_3 , dénitrification et émissions de N_2O) et de lessivage de nitrates. De plus, l'intensification de la production dans les systèmes de cultures nécessite des apports importants d'azote sous forme d'engrais de synthèse qui, étant découplés de C, viennent accroître les accumulations de formes réactives de N (NH_4^+ et NO_3^-) dans les sols et les risques d'émissions polluantes qui peuvent en résulter. Ces apports de N contribuent également à augmenter l'activité des communautés microbiennes du sol et, donc, à augmenter leur capacité de minéralisation de la matière organique du sol, ce qui contribue à diminuer le temps de résidence de C dans les sols et la capacité de ceux-ci à séquestrer le CO_2 atmosphérique.

Pour contrecarrer ces risques liés à l'intensification des systèmes de culture, deux actions peuvent être mises en œuvre : (1) utiliser davantage de légumineuses pour que l'azote qui rentre dans l'agro-système par la fixation biologique soit directement couplé à une quantité correspondante de C ; et (2) réduire au maximum les périodes de sol nu sans végétation en utilisant des plantes d'interculture (Hargrove, 1991). Ces effets bénéfiques des intercultures peuvent en outre être amplifiés par l'adoption de méthodes simplifiées de travail du sol, visant à mieux conserver le couplage C-N (Franzluebbers, 2007).

En ce sens, les pratiques de l'agriculture

Revue et synthèses

de conservation, qui réduit le travail mécanique du sol (pas de labour) et minimise la période de sol nu entre deux cultures, à l'aide de plantes de couverture ou des cultures intermédiaires, sont des moyens pour minimiser le découplage C-N et, ainsi, favoriser un fonctionnement des sols minimisant les pertes de N vers l'environnement. Cette pratique qui consiste à maintenir le plus possible une couverture végétale active sur le sol imite en quelque sorte le rôle de la prairie, en maintenant un apport de C le plus constant possible et, donc, en favorisant le couplage avec N et P. Cette pratique contribue à entretenir la biomasse microbienne du sol, ce qui permet une meilleure nutrition minérale des plantes. Comme cela a été établi par Gardner et Faulkner (1991), la biomasse produite par les cultures intermédiaires insérées dans les rotations céréalières peut être avantageusement valorisée pour l'alimentation d'herbivores domestiques produisant du lait ou de la viande, avant de retourner au sol sous formes de déjections pour fournir des éléments N et P aux cultures suivantes. Carvalho *et al.* (2010) ont montré que le pâturage d'un ray-grass d'Italie en interculture était possible dans un système de monoculture de soja au Brésil. Aux États-Unis, Franzluebbbers et Stuedemann (2010) ont montré qu'une valorisation au pâturage des intercultures pouvait augmenter le stockage de C et N et la qualité globale des sols.

L'introduction de séquences de prairies temporaires, pâturées ou fauchées, dans les rotations de cultures annuelles représente une possibilité importante pour l'intégration agriculture-élevage (Katsvairo *et al.*, 2006 ; Allen *et al.*, 2007 ; Franzluebbbers, 2007). En effet, de telles rotations peuvent bénéficier soit directement des avantages de la prairie mentionnés précédemment, pendant la phase de prairie elle-même, soit indirectement des arrière-effets positifs de la prairie sur les cultures suivantes. Ces arrière-effets peuvent être multiples :

- amélioration de la structure des sols,
- recyclage de N et P et économies d'engrais azotés et phosphatés,

- contrôle des adventices et économies d'herbicides,
- contrôle des prédateurs et des maladies et économies de pesticides.

Ces effets sont assez bien identifiés dans la littérature scientifique (Lemaire *et al.*, 2015 ; Martin *et al.*, 2020), mais ils sont mal quantifiés en raison du poids important des conditions locales de sol et de climat dans l'amplitude des effets constatés. Ces effets sont donc rarement pris en compte dans les évaluations économiques des systèmes de culture. Cela demeure donc un enjeu important pour l'agronomie de se doter des outils d'évaluation de ces systèmes de production intégrés incluant l'élevage, tant sur les plans des performances productives que sur ceux des performances environnementales.

3. L'intensification liée à la spécialisation des systèmes de production aboutit à des impacts environnementaux inacceptables

Après la Seconde Guerre mondiale, l'industrialisation de l'agriculture, fondée sur l'utilisation intensive des engrais et sur la mécanisation du travail, a rendu cette intégration entre élevage et agriculture beaucoup moins nécessaire, puisque le bas prix de l'énergie fossile et des intrants fertilisants permettait de se passer de l'animal comme agent de recyclage. La compétitivité des marchés agricoles, fondée sur le paradigme des économies d'échelle, a engendré à la fois un agrandissement et une spécialisation des exploitations agricoles. En conséquence, l'élevage, d'une part, et l'agriculture, d'autre part, se sont développés et intensifiés séparément, dans des exploitations devenues spécialisées. Bien plus, les contraintes naturelles et socio-économiques locales ont conduit l'ensemble des exploitations d'une même région à suivre des évolutions identiques et homogènes, aboutissant à une uniformisation des systèmes à l'échelle régionale : grandes plaines céréalières intensives du Bassin parisien et concentration excessive des productions animales en

Revue et synthèses

Bretagne. Ainsi, selon Mignolet *et al.* (2007), dans le Bassin parisien, la proportion d'exploitations de polyculture-élevage est passée de 27 % dans les années 1970 à 15 % dans les années 2000, alors que, dans le même temps, le pourcentage des exploitations de grande culture passait de 48 à 64 %.

À l'échelle mondiale, une forte spécialisation de la production agricole a également eu lieu en réaction aux contraintes socio-économiques qui sont imposées essentiellement pour obtenir les gains de productivité permis par les économies d'échelle (Russelle *et al.*, 2007 ; Hendrickson *et al.*, 2008). Cette spécialisation a inéluctablement conduit à une forte réduction du nombre d'exploitations agricoles et, donc, du nombre de paysans (Hanson et Hendrickson, 2009). Le phénomène a été d'autant plus rapide que la politique des pays industrialisés (Europe de l'Ouest et Amérique du Nord), après la Seconde Guerre mondiale, était de réduire les coûts d'accès à la nourriture et de libérer une main d'œuvre devant migrer des campagnes vers les emplois industriels dans les zones urbaines, ce qui a été clairement l'objectif de la Politique agricole commune en Europe (Lemaire et Chatelier, 2023).

Les décisions stratégiques des agriculteurs concernant la spécialisation de leur exploitation sont influencées par un grand nombre de facteurs : structure des marchés agricoles, structure du foncier et pression de l'urbanisation, contraintes environnementales (Ickowicz *et al.*, 2010), ce qui aboutit en général à une convergence locale et régionale de l'évolution des systèmes de production vers une spécialisation relativement uniforme à l'échelle d'un même territoire. Cette spécialisation et cette homogénéisation de l'agriculture se sont donc réalisées à tous les niveaux d'organisation temporels ou spatiaux, de la production agricole : rotations culturale, assolements, exploitations individuelles, territoires entiers, voire régions entières. À ces contraintes externes doivent s'ajouter les implications liées à la pénibilité du métier d'éleveur, avec des difficultés sociales qui pèsent souvent lourd dans les décisions d'abandon des ateliers d'élevage, en particulier

des herbivores, dans les exploitations mixtes de polyculture-élevage (Lemaire et Chatelier, 2023). L'intensification de la production agricole, lorsqu'elle résulte de la spécialisation et de l'uniformisation des systèmes de production, aboutit inévitablement à des impacts environnementaux qui, aujourd'hui, ne sont plus admis par les sociétés humaines (Tilman *et al.*, 2002). Ces impacts sont : la contamination des eaux de surface et souterraines ; les émissions de gaz à effet de serre et la contribution au réchauffement climatique ; l'érosion, la contamination et la perte de qualité des sols ; la perte de biodiversité, et la dégradation de la qualité des paysages (Franzluebbbers *et al.*, 2011). Il convient également de prendre en compte les excès de circulation de P à l'échelle des territoires liés aux fertilisations minérales parfois excédentaires dans les systèmes de culture de certaines régions, et aux concentrations excessives d'élevages dans d'autres régions, avec des conséquences importantes sur l'eutrophisation des milieux (Senthikumar *et al.*, 2012).

Le résultat de l'hyperspécialisation territoriale actuellement en cours est que l'intensification séparée des productions animales, sur certains territoires, et des grandes cultures, sur d'autres territoires éloignés des premiers, ne permet plus les couplages entre les cycles de C, N et P et les recyclages des éléments nutritifs pour les cultures, ce qui entraîne, dans chacun des cas, des dégâts environnementaux qui deviennent inacceptables et fragilisent ces systèmes de production vis-à-vis des changements climatiques en cours.

4. Vers un nouveau paradigme conciliant productivité des systèmes agricoles et qualité de l'environnement

Les sciences agronomiques doivent maintenant affronter la contradiction entre la nécessité d'augmenter la production agricole mondiale de denrées alimentaires sur des surfaces cultivables non extensibles, afin de nourrir une population de bientôt 10 milliards d'individus, et

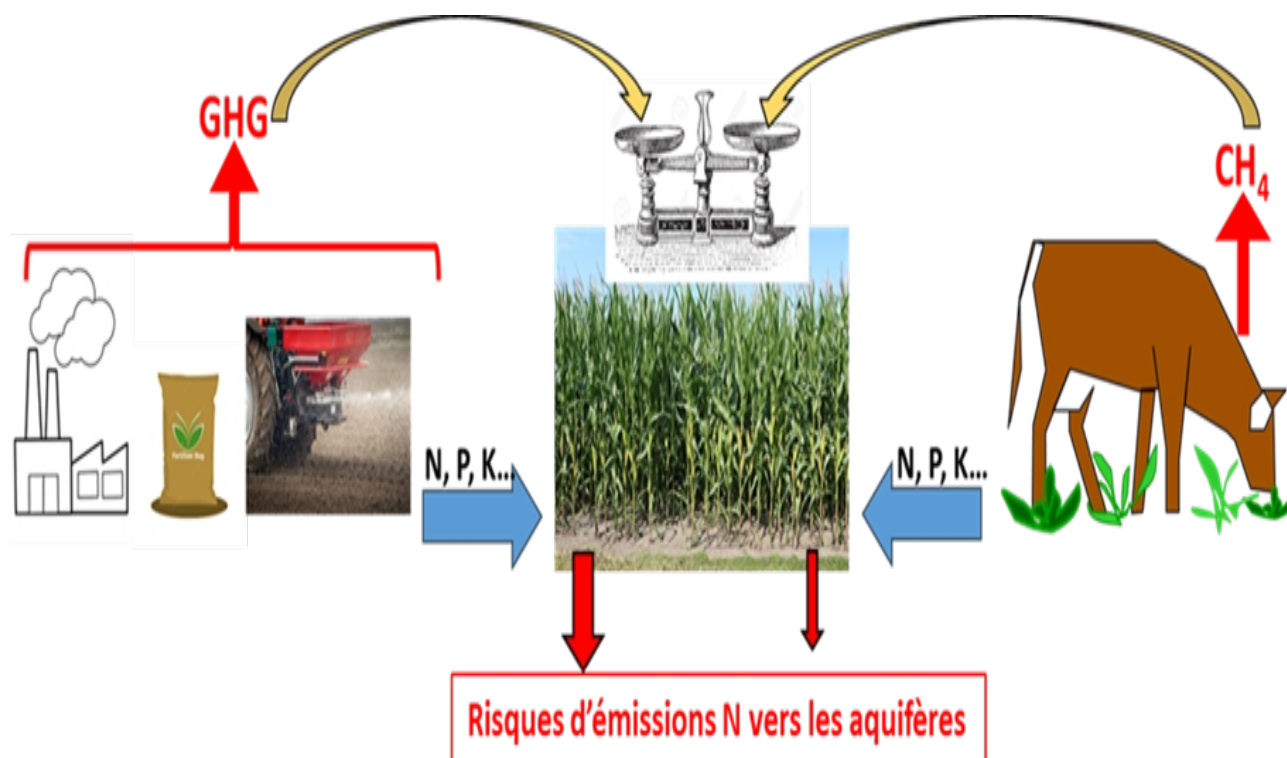


Figure 2. La place des herbivores domestiques dans les agro-systèmes à l'échelle territoriale doit être dimensionnée en fonction des compensations possibles entre la diminution des émissions de gaz à effet de serre et les risques de pollution des aquifères liés à la diminution de l'usage en engrais de synthèse, et l'émission de méthane (CH₄) par les animaux.

l'urgence qu'il y a de préserver les ressources non renouvelables et la biodiversité, tout en restaurant un environnement acceptable pour les sociétés humaines.

Un rééquilibrage de l'alimentation humaine avec des régimes moins carnés dans les pays les plus industrialisés est donc indispensable (Duru *et al.*, 2021), ne serait-ce que pour en limiter les conséquences sur la santé, même si l'accès aux produits animaux dans les pays en développement reste une nécessité pour leur nutrition. L'élevage des herbivores n'entre pas nécessairement en compétition avec les humains pour les ressources alimentaires tant que ces animaux valorisent les prairies et les ressources fourragères grâce à leur faculté de digestion de la cellulose, laquelle est une ressource non utilisable par l'Homme pour son alimentation. Certains systèmes d'élevages laitiers, justement fondés sur l'herbe, sont même considérés comme des

producteurs nets de protéines (Laise *et al.*, 2018). Ces ressources fourragères peuvent être produites sur des surfaces, les prairies, souvent peu propices à la mise en culture (Lemaire *et al.*, 2011). De plus, ces surfaces de prairies, du fait de la permanence des interactions entre le sol et la végétation et du couplage entre les cycles de C, N et des autres minéraux (P, K et micro-oligo-éléments), et du fait de la diversité des communautés de plantes et de micro-organismes du sol qu'elles hébergent et des réseaux trophiques qui s'y développent, doivent être considérées non seulement comme produisant des ressources fourragères pour la production animale, mais aussi et surtout comme sources de services écosystémiques. Ces services écosystémiques ont la capacité de résorber certains des impacts environnementaux négatifs engendrés par l'intensification de la production agricole (Lemaire *et al.*, 2005). Ainsi il

existe une compensation entre l'émission de méthane (CH₄) par les ruminants et l'ensemble des services écosystémiques qui sont produits par les prairies et cultures fourragères qui servent à les nourrir. Condamner l'élevage des herbivores au prétexte que la digestion de la cellulose produit naturellement du CH₄, reviendrait à se condamner à ne plus bénéficier des fonctions essentielles des prairies exploitées par les herbivores domestiques dans les équilibres écologiques, soit près de 40 % des surfaces continentales de la planète. Supprimer l'élevage des ruminants reviendrait à faire disparaître une grande partie des prairies de la planète, qui se maintiennent à l'état de prairies parce qu'elles sont régulièrement exploitées et, notamment, pâturées par des animaux qui, bien qu'émettant du CH₄, contribuent à l'équilibre écologique de la planète et au maintien de la diversité indispensable des agro-écosystèmes.

En revanche, nourrir des ruminants à base de mono-cultures de maïs et de soja importé pour produire du lait ou de la viande n'est plus une solution admissible. Il convient donc de trouver le juste équilibre entre élevage des herbivores et agriculture à l'échelle des territoires. Cela implique le maintien ou le retour d'élevages et de prairies dans les régions maintenant spécialisées en production céréalière, afin de bénéficier du couplage entre les cycles du carbone, de N et de P, conjointement avec le cycle de l'eau. De manière symétrique, il peut s'agir aussi, parfois, d'introduction des îlots locaux d'agriculture dans les zones et régions purement pastorales où la pression démographique entraîne un excès de chargement animal. Cette diversification permettrait d'obtenir un équilibre écologique plus durable en enravant la dégradation de la végétation et des milieux en cours dans ces régions : Afrique subsaharienne, steppes de l'Asie et parcours pastoraux méditerranéens.

Il est impératif de retrouver un équilibre local et régional entre production animale à base d'herbivores et grandes cultures. Cela peut être réalisé en associant territorialement des unités de productions qui resteraient relativement spécialisées, mais qui devraient coopérer, afin d'assurer localement le couplage des cycles de C, N, et P pour éviter les pollutions des eaux et les

émissions de gaz à effet de serre, et assurer une forme de résilience globale de l'agriculture face aux changements climatiques. Il s'agit ainsi d'instituer une approche intégrée du « métabolisme » d'un territoire, où « anabolisme » et « catabolisme » seraient reliés et équilibrés grâce à des connections fonctionnelles entre des unités qui pourraient être elles-mêmes relativement spécialisées. C'est donc bien l'équilibre entre anabolisme (couplage C-N-P) et catabolisme (découplage C-N-P) qu'il convient d'organiser et de gérer à l'échelle d'un territoire agricole (Figure 1).

L'élevage des herbivores domestiques prend alors une importance toute particulière, grâce aux services écosystémiques associés aux surfaces de prairies et aux cultures fourragères à base de légumineuses. La diminution de la pression des adventices, des maladies et des insectes ravageurs des cultures, et la réduction de l'usage des pesticides liée à cette diversification dans les rotations et assolements et à l'échelle des paysages sont des avantages résultant de la diversification des systèmes : les indices de traitement de grandes cultures céréalières par des pesticides sont réduits de 43 % environ (par rapport aux situations de grandes cultures sans élevage) lorsque les cultures sont associées à des systèmes d'élevage impliquant des rotations avec prairies et cultures fourragères (Mischler *et al.*, 2020). De même, l'introduction de séquences de prairies temporaires ou de cultures fourragères dans les rotations céréalières réduit fortement la dynamique des adventices et permet de réduire l'usage des herbicides (Meiss *et al.*, 2010a ; 2010b). Le recyclage des éléments nutritifs du sol et la diminution du recours aux engrais qui en découle rendraient ces systèmes de production agricole beaucoup plus autonomes et résilients (Viaux, 2020). Enfin une agriculture plus diversifiée devrait pouvoir être une source de travail humain, avec une valeur sociale accrue (Hoagland *et al.*, 2010).

Le problème qu'il faut cependant aborder sera celui de l'adaptation de ces systèmes de culture très diversifiés, comprenant des prairies permanentes ou temporaires, aux changements

climatiques en cours. L'échauffement de l'atmosphère et l'augmentation de sa teneur en CO₂ ne semblent pas devoir poser de problèmes et devraient seulement provoquer une évolution des équilibres entre espèces prairiales constitutives des prairies (Durand, 2016). En revanche, l'accentuation de la durée et de l'intensité des périodes de sécheresse peut remettre en cause la pérennité de certains types de mélanges d'espèces prairiales et le recours à d'autres mélanges plus résilients (Durand, 2016) ou à une utilisation plus importante de cultures fourragères annuelles susceptibles de fournir des réserves alimentaires, afin de passer les périodes de disette.

Le défi n'est ni de redécouvrir, ni de restaurer une forme d'agriculture ancestrale, en reconstituant la « ferme de nos grands-parents », ce qui aboutirait inévitablement à une diminution globale de la production agricole, incompatible avec la nécessité d'assurer la sécurité alimentaire à l'échelle mondiale. Bien au contraire, il s'agit d'utiliser toutes les connaissances et les moyens techniques disponibles aujourd'hui et demain afin de concevoir de nouveaux systèmes de production agricole permettant une production alimentaire à haute valeur socio-économique, avec des impacts environnementaux qui deviendraient enfin acceptables (Schiere *et al.*, 2002 ; Sulc et Tracy, 2007). Ce couplage entre agriculture et élevage devra être mis en oeuvre à tous les niveaux d'organisation de la production agricole : le champ, où les processus biogéochimiques déterminent les flux environnementaux ; l'exploitation agricole, où les décisions techniques sont élaborées et mises en oeuvre ; le paysage et le territoire, où les interactions spatiales et temporelles entre les différentes modalités de production doivent s'établir ; et la région et le continent où les contraintes socio-économiques s'exercent et où les décisions politiques s'élaborent.

5. La diversité dans les systèmes de production agricole : un antidote contre les impacts environnementaux de l'intensification

La diminution récente de la diversité des cultures

au sein des systèmes de culture et des rotations liée à la disparition de l'élevage des herbivores, et, donc, des cultures fourragères et des prairies qui lui étaient associées, réduit fortement la fourniture des services écosystémiques : l'amélioration de la structure des sols ; la régulation de la circulation et du stockage de l'eau dans les sols ; le recyclage des éléments nutritifs ; la séquestration du CO₂ atmosphérique ; la diversité biologique des sols, et la régulation des populations d'adventices, d'insectes et de maladies (Franzuebbers *et al.*, 2011). De surcroît, la biodiversité à l'échelle du paysage pour un grand nombre d'espèces (insectes, oiseaux, batraciens, reptiles, micro-mammifères) dépend notablement de la diversité spatiale des modes d'occupation des sols et, donc, de la diversité des assolements (Bretagnolle *et al.*, 2011a). Notamment l'importance des surfaces à végétation herbacée pérenne et leur agencement jouent un grand rôle dans la dynamique des populations de différentes espèces d'oiseaux (Bretagnolle *et al.*, 2011b).

Le défi actuel pour la recherche agronomique est de remplacer l'ancien paradigme, fondé sur la simplification et la standardisation des systèmes de production pour optimiser la productivité du travail (concept d'économie d'échelle), par un nouveau paradigme, fondé sur l'accroissement de la diversité des productions en vue d'optimiser la productivité par unité de ressource naturelle utilisée, grâce aux interactions entre les diverses composantes du systèmes (concept d'économie de gamme). Ainsi le problème de l'agriculture intensive actuelle n'est pas tant son trop fort niveau d'intensification que celui de sa trop faible diversité (Lemaire *et al.*, 2014). Il s'agit non pas de réduire la productivité, ce qui conduirait inmanquablement à des problèmes de sécurité alimentaire au niveau mondial, mais d'augmenter la diversité intra- et inter-systèmes de production agricole. À cette fin, l'agronomie doit s'appuyer plus largement qu'elle ne l'a fait dans le passé sur l'écologie et, plus particulièrement, sur deux domaines d'application récents de cette discipline :

- l'écologie des paysages, pour analyser l'organisation territoriale des activités agricoles, qui engendre des patrons spatiaux de diversité des pratiques. De ceux-ci peuvent découler des interactions spatiales et temporelles qui favorisent la régulation des flux environnementaux vers l'hydrosphère et vers l'atmosphère, et la dynamique de la biodiversité ;

- l'écologie industrielle, pour analyser, grâce aux concepts de cette nouvelle discipline, les interactions qui doivent s'établir entre entreprises agricoles d'amont et d'aval partageant un même territoire, en vue d'optimiser les filières de production et de transformation, en organisant les recyclages et en limitant ainsi les impacts environnementaux tant locaux que globaux.

Il faut donc rompre le lien qui s'est établi historiquement entre intensification et uniformisation des systèmes de production agricole, et l'on fait l'hypothèse que ce lien n'est pas inéluctable, à condition de sortir du cadre de contraintes qui l'a engendré.

6. Nécessité d'une approche à l'échelle territoriale et régionale

6.1. Des « méta-agrosystèmes » à l'échelle territoriale ?

La plupart des impacts environnementaux de l'agriculture, tels que l'érosion des sols, la qualité des eaux, la qualité de l'air, la dynamique des populations et communautés d'espèces et la biodiversité, ne peuvent s'appréhender qu'à des niveaux d'organisation plus vastes que ceux de la parcelle et de l'exploitation agricole. Ces impacts ne peuvent s'analyser qu'au niveau de territoires, de régions, voire de continents entiers.

De tels impacts résultent de processus qui mettent en jeu des interactions entre les composantes géologique, pédologique et topographique des paysages, ce qui ne peut donc s'analyser par une simple agrégation spatiale de processus locaux. Ces interactions sont structurées par les modes d'agencements spatiaux des unités paysagères qui résultent en grande partie des patrons de répartition spatiale

et temporelle des différents modes d'occupation des sols à l'échelle territoriale (structure des exploitations agricoles, structure des parcelles, assolements, rotations, surfaces non agricoles adjacentes, linéaires et bordures de champs, etc.). Une approche spatialisée des systèmes d'exploitation agricole s'impose (Darnhofer *et al.*, 2012). Ainsi il est nécessaire de développer une approche territoriale de la diversité des systèmes d'exploitation agricole, de leur dynamique de réponse aux changements climatiques en cours et de leurs conséquences sur la production de services écosystémiques (Lambin *et al.*, 2000 ; Lazrak *et al.*, 2010).

En Europe et en Amérique du Nord, la séparation de l'agriculture et de l'élevage dans des exploitations spécialisées de territoires disjoints et éloignés, est une tendance lourde qu'il sera difficile d'inverser. Cependant, dans des régions de polyculture-élevage telles que la Lorraine, la Normandie et les pourtours du Massif central, persiste une grande diversité de systèmes de production (Gibon *et al.*, 2010) ; là, agriculture et élevage peuvent cohabiter et interagir. Cependant il doit être possible, à partir d'exploitations individuelles elles-mêmes spécialisées, de promouvoir une diversité de systèmes de production à l'échelle territoriale en favorisant et en organisant les interactions entre exploitations spécialisées en grandes cultures d'une part, et en élevage d'autre part, créant ainsi un « méta-agrosystème » à l'échelle territoriale (Leterme *et al.*, 2019).

Une telle approche nécessite de prendre en compte les structures d'aval de collecte et de transformation des denrées agricoles, qui sont parfois à l'origine de la spécialisation des territoires et de leur uniformisation, en imposant des contraintes d'économie d'échelle et de mise en marché. La diversité des systèmes de production agricole à l'échelle d'un même territoire implique donc une restructuration de l'ensemble des structures d'amont d'approvisionnement et des structures d'aval de l'industrie agro-alimentaires, qui sont aujourd'hui organisées en filières verticales relativement indépendantes vers des organisations

L'hyper-spécialisation régionale est-elle inévitable ?

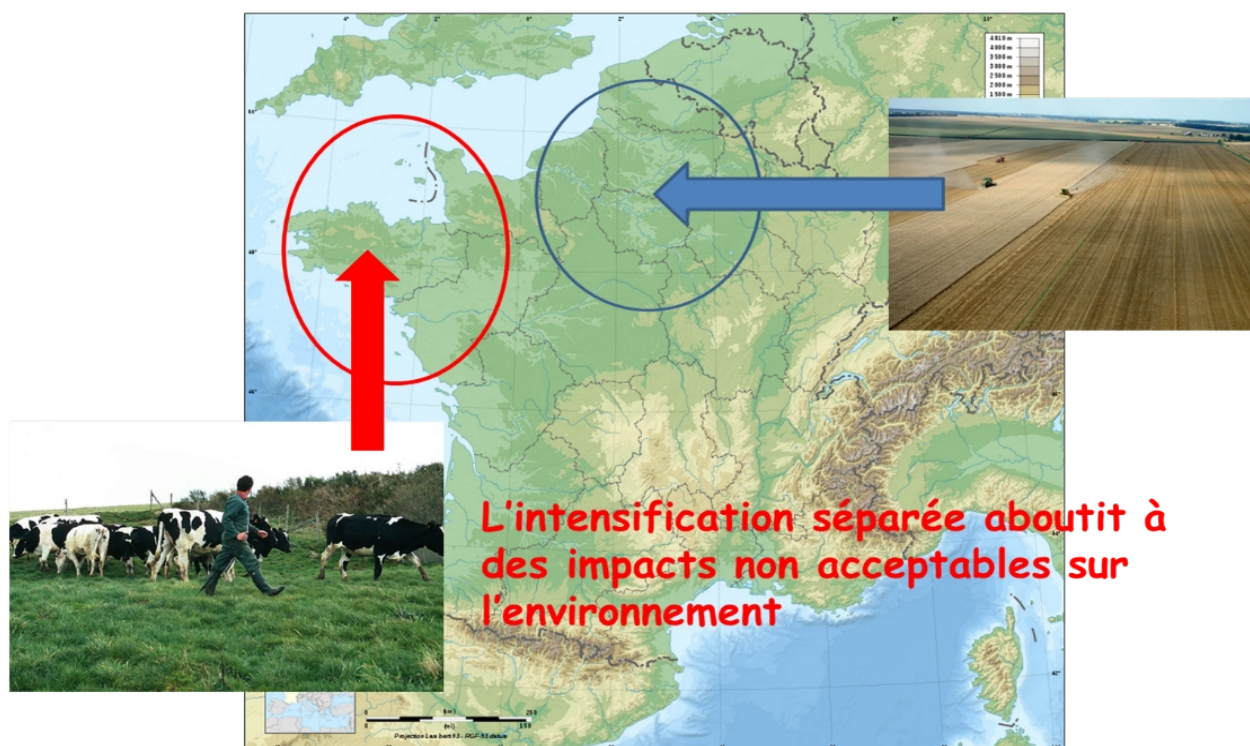


Figure 3. La concentration excessive de l'élevage en Bretagne et la spécialisation céréalière excessive du Bassin parisien aboutissent dans chaque situation à des impacts environnementaux locaux qui ne sont plus acceptables du fait de la rupture des cycles de C, N et P et des boucles de couplage-découplage qui ne peuvent plus s'exercer au niveau local.

résolument horizontales, recherchant et valorisant les plus-values socio-économiques et environnementales liées aux interactions entre filières (Duru et Théron, 2021).

6.2. Une problématique à l'échelle mondiale

À l'échelle de la planète entière, le problème de l'association entre élevage et agriculture est dominé par la question concernant l'équilibre à atteindre entre les protéines d'origine animale et les protéines d'origine végétale dans notre alimentation : éviter les excès de protéines animales dans les pays « riches », et éviter les carences nutritionnelles dans les pays les plus pauvres. De cet équilibre, il découle qu'une certaine proportion des surfaces disponibles

pour la production directe de denrées alimentaires végétales pour l'alimentation humaine pourrait être consacrée à la production de l'alimentation des herbivores domestiques à la condition d'être intégrée dans un système qui assure la durabilité de la production agricole globale.

La ré-association entre agriculture et élevage dans les pays industrialisés où ces deux systèmes de production ont été intensifiés séparément, non seulement dans des exploitations différentes mais aussi dans des régions éloignées, est aujourd'hui un enjeu capital pour construire une agriculture durable qui puisse conserver sa capacité productive (Franzluebbers *et al.*, 2011 ; Peyraud, 2011). Cette disjonction entre élevage et agriculture

aboutit, comme le montrent parfaitement les études de Billen *et al.* (2019), à une déconnexion presque totale de l'alimentation effective de l'Europe avec son propre territoire, du fait que son élevage est grandement tributaire des monocultures de soja en Amérique du Sud et du Nord. Dans les pays d'Afrique du Nord et du Moyen Orient, la séparation de l'élevage, concentré sur les zones de steppes, et de la céréaliculture, concentrée sur les zones les plus fertiles, a engendré, d'une part, une dégradation importante de la ressource fourragère liée à une surexploitation de la végétation dans les zones pastorales, et, d'autre part, une dégradation et une érosion des sols dans les zones de monoculture. Une ré-association locale entre systèmes de production céréaliers et systèmes de pastoralisme semble nécessaire pour une évolution vers l'autonomie alimentaire de ces zones arides et semi-arides (Ameziane et Abdelguerfi, 2011).

Les régions tempérées et sub-tropicales de l'Amérique du Sud (Argentine, Uruguay, sud du Brésil), qui étaient caractérisées par une production bovine extensive sur les prairies semi-naturelles, sont le siège d'une mutation agricole fondamentale, fondée sur le retournement des prairies et la monoculture de soja et de maïs destinée principalement à l'exportation pour l'alimentation animale en Europe et en Asie (Viglizzo *et al.*, 2010). Des systèmes locaux d'intégration entre élevages bovins sur prairies et cultures annuelles permettent une intensification durable de la production globale, et sont donc proposés comme alternatives aux monocultures actuelles (Carvalho et Moraes, 2011).

7. Conclusion

Aujourd'hui encore, les systèmes de production agricole et les systèmes de transformations et de distributions alimentaires sont organisés selon le principe de l'économie d'échelle et enracinés dans un monde où l'énergie était abondante et peu onéreuse, où le climat était stable et où les coûts des nuisances affectant l'environnement étaient totalement externalisés et donc

absolument pas comptabilisés comme composante interne du système. Alors que la société affronte le défi du changement climatique, impliquant une réduction considérable de l'émission des gaz à effet de serre et celui de la crise de la biodiversité impliquant la restauration des équilibres écologiques dans les paysages ruraux, l'agriculture doit prendre sa part de l'effort dans ces deux directions, tout en s'adaptant aux nouvelles contraintes liées au réchauffement en cours du climat et en continuant à produire suffisamment de denrées alimentaires pour nourrir d'une manière saine et sécurisée une population humaine mondiale croissante. Ce défi pour l'agriculture implique que les interactions et synergies entre la production végétale et la production animale soient restaurées au niveau local afin de bénéficier d'une meilleure efficacité environnementale, énergétique, écologique, économique et sociale (Lemaire, 2014).

Toutefois ce changement de paradigme pour l'agriculture sera vain, voire impossible à opérer, si l'ensemble de la chaîne d'aval allant de la production agricole jusqu'au consommateur final, en passant par la collecte des récoltes, leur transformation technique et industrielle, leur mise en marché et leur mode de distribution, lequel impose aujourd'hui aux producteurs agricoles les normes et contraintes qui les obligent à se spécialiser et à s'uniformiser, n'est pas elle-même fondamentalement transformé. Pour cela, il importe que les chaînes de valeur puissent prendre en compte la diversité des produits et leurs synergies de gamme au lieu de la seule et unique réduction des coûts. Il faut également, pour avoir une agriculture diversifiée, que les régimes alimentaires des populations humaines soient eux-mêmes davantage équilibrés et reposent davantage sur une large gamme de production d'aliments de différente nature.

L'industrie agro-alimentaire d'aujourd'hui propose aux consommateurs une diversité alimentaire en trompe l'œil, qui consiste en réalité à produire un très petit nombre de denrées de base de manière la plus standardisée et homogène possible, et cela de

la manière la plus massive possible sur des territoires entiers, afin d'en réduire les coûts de production, pour ensuite reconstituer une diversité factice d'aliments transformés. Ce système alimentaire faussement « diversifié » montre aujourd'hui ses limites à travers le développement des pathologies liées justement à l'absence de vraies diversités dans les régimes alimentaires dans les pays les plus riches (Duru, 2021). Il ne peut y avoir d'agriculture diversifiée sans un système alimentaire qui soit lui-même diversifié : « Dis-moi ce que tu manges et je te dirais quelle agriculture tu auras ». C'est donc *in fine* aux citoyens qu'il revient de faire advenir ce changement de paradigme de l'agriculture, par leurs choix de consommation.

Pour arriver à de nouvelles organisations de la production agricole au niveau des territoires, il convient de créer des synergies locales entre exploitations d'élevage et exploitations agricoles qui pourront elles-mêmes rester spécialisées. Il convient également que les filières d'amont et d'aval s'organisent entre elles de manière cohérente dans le cadre du paradigme de l'économie de gamme permettant de créer de la valeur socio-économique à partir de la diversité des productions.

Références

- Allen VG, Brown CP, Segarra E, Green CJ, Wheeler TA, Acosta-Martinez V, Zobeck TM. 2007. In search of sustainable agricultural systems for the Llano Estacado of the U.S. Southern High Plains, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 124, 3-12. DOI: 10.1016/j.agee.2007.08.006.
- Ameziane T, Abdelguerfi A. 2011. Interactions between cereal cropping systems and pastoral areas as the basis for sustainable agriculture development in Mediterranean countries. In Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A (eds) *Grassland Productivity and Ecosystem Services*, CAB Int., Wallingford, UK, 261-270.
- Berthelin J, Laba M, Lemaire G, Powlson D, Soussi B, Tessier D, Wander M, Baveye P. 2022. Soil carbon sequestration for climate change mitigation: Mineralization kinetics of organic inputs as an overlooked limitation, *European Journal of Soil Sciences*, 73. DOI: 10.1111/ejss.13221.
- Billen G, Lassaletta L, Garnier J, Le Noë J, Aguilera E, Sanz-Cobena A. 2019. Opening to distant markets or local reconnection of agro-food systems ? Environmental consequences at regional and global scales. In Lemaire G, de Facio Carvalho PC, Kronberg S, Recous S (eds) *Agroecosystem diversity. Reconciling contemporary agriculture and environment quality*, Academic Press, Elsevier, London. 391-413.
- Bretagnolle V, Gauffre B, Meiss H, Badenhauer I. 2011a. The role of grassland areas within arable cropping systems for conservation of biodiversity at the regional level. In Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A (eds) *Grassland Productivity and Ecosystem Services*, CAB Int., Wallingford, UK, 251-260.
- Bretagnolle V, Villers A, Denonfoux L, Cornulier T, Inchausti P, Badenhauer I. 2011b. Rapid recovery of a depleted population of Little Bustard (*Tetrax tetrax*) following provision of alfalfa through an agri-environment scheme, *Ibis*, 153, 4-13. DOI: 10.1111/j.1474-919X.2010.01092.x.
- Carvalho PCF, Anghinoni I, Moraes A. 2010. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems, *Nutrition Cycling Agroecosystems*, 88, 259-273. DOI: 10.1007/s10705-010-9360-x.
- Carvalho PCF, Moraes A. 2011. Integration of grasslands within crop systems in South America. In Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A (eds) *Grassland Productivity and Ecosystem Services*, CAB Int., Wallingford, UK, 219-228.
- Darnhofer I, Gibbon D, Dedieu B (eds). 2012. *Farming Systems Research into the 21st*

- Century: *The New Dynamic*. Springer, 490 p. DOI: 10.1007/978-94-007-4503-2.
- Durand JL. 2016. Adaptation des prairies semées au changement climatique : amélioration génétique et intensification écologique [Contrat] auto-saisine, 41 p. hal.science/hal-01594783.
- Duru M, Le Bras C, Grillot M. 2021. Une approche holistique de l'élevage, au cœur des enjeux de santé animale, humaine et environnementale, *Cahiers agricultures*, 30, 26. DOI: 10.105/cagri/2021013.
- Duru M, Théron, O. 2021. L'évaluation des systèmes agricoles à l'aune des services écosystémiques et de l'économie circulaire, *Agronomie Environnement et Société*, 11-1.
- Duru M. 2021. Microbiote intestinal et santé : une nécessaire refonte de notre système agro-alimentaire, *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. DOI: 10.1016/j.cnd.2021.10.006.
- Flechard CR, Neftel A, Jocher M, Ammann C, Fuhrer J. 2005. Bi-directional soil/atmosphere N₂O exchange over two mown grassland systems with contrasting management practices, *Global Change Biology*, 11, 2114-2127. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01056.x.
- Franzluebbers AJ. 2007. Integrated crop-livestock systems in the southeastern USA, *Agronomy Journal*, 99, 361-372. DOI: 10.2134/agronj2006.0076.
- Franzluebbers AJ, Stuedemann JA. 2010. Surface soil changes during twelve years of pasture management in the Southern Piedmont USA, *Soil Science Society of America Journal*, 74, 2131-2141. DOI: 10.2136/sssaj2010.0034.
- Franzluebbers AJ, Sulc RM, Russelle MP. 2011. Opportunities and challenge for integrating North-American crop and livestock systems. In Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A (eds) *Grassland Productivity and Ecosystem Services*, CAB Int., Wallingford, UK, 208-218.
- Gardner JC, Faulkner DB. 1991. Use of cover crops with integrated crop-livestock production systems. In Hargrove WL (ed) *Cover Crops for Clean Water. Soil and water Conservation Society*, Ankeny, IA, 185-191.
- Gibon A, Sheeren D, Monteil C, Ladet S, Balent G. 2010. Modelling and simulating change in reforesting mountain landscapes using a social-ecological framework, *Landscape Ecology*, 25, 267-285. DOI: 10.1007/s10980-009-9438-5.
- Hanson J, Hendrickson J. 2009. Toward a sustainable agriculture. In Franzluebbers AJ (ed) *Farming with Grass: Achieving Sustainable Mixed Agricultural Landscapes*, Soil and Water Association Society, Ankeny, IA, 26-36.
- Hargrove WL (ed) 1991. *Cover Crops for Clean Water*, Soil and Water Conservation Society, Ankeny, IA.
- Hendrickson J, Sassenrath GF, Archer D, Hanson J, Halloran J. 2008. Interactions in integrated US agricultural systems: the past, present and future, *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23, 314-324. DOI: 10.1017/S1742170507001998.
- Hoagland L, Hodges L, Helmers GA, Brandle JR, Francis CA. 2010. Labor availability in an integrated agricultural system, *Journal of Sustainable Agriculture*, 34, 532-548. DOI: 10.1080/10440046.2010.484697.
- Ickowicz A, Bah A, Bommel P, Choisis JP, Etienne M, Gibon A, Lasseur J, Morales H, Toure I, Tourrand JF. 2010. Facteurs de transformation des systèmes d'élevage extensifs des territoires : étude comparée des dynamiques locales sur trois continents, *Cahiers Agricultures*, 19, 127-134. DOI: 10.1684/agr.2010.0382.
- Katsvairo TW, Wright DL, Marois JJ, Hartzog DL, Rich JR, Wiatrak PJ. 2006. Sod-livestock integration into peanut-cotton rotation: a system farming approach, *Agronomy Journal*, 98, 1156-

1171. DOI: 10.2134/agronj2005.0088.

Laisse S, Baumont R, Dusart L, Gaudré D, Rouillé B, Benoit M, Veysset P, Rémond D, Peyraud JL. 2018. L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine, *INRAE Productions animales*, 31, 3, 269-288. DOI: 10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355.

Lambin EF, Rounsevell MDA, Geist HJ. 2000. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity?, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82, 321-331. DOI: 10.1016/S0167-8809(00)00235-8.

Lazrak EG, Mari JF, Benoit M. 2010. Landscape regularity modelling for environmental challenges in agriculture, *Landscape Ecology*, 25, 169-183. DOI: 10.1007/s10980-009-9399-8.

Ledgard SF, Schils R, Eriksen J, Luo J. 2009. Environmental impacts of grazed clover/grass pastures. *Irish Journal of Agriculture and Food Research*, 48, 209-226. <https://www.jstor.org/stable/20720369>.

Lemaire G, Wilkins R, Hodgson J. 2005. Challenge for grassland science: Managing research priorities, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 108, 99-108. DOI: 10.1016/j.agee.2005.01.003

Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A. 2011. Food security and environmental impacts - Challenge for grassland sciences. In Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A (eds) *Grassland Productivity and Ecosystem Services*, CAB Int., Wallingford, UK, xii-xvii.

Lemaire G. 2014. L'intégration agriculture-élevage: un enjeu mondial pour concilier production agricole et environnement, *Innovations agronomiques*, 39, 181-190.

Lemaire G, Franzluebbers A, de Faccio Carvalho PC, Dedieu B. 2014. Integrated crop-livestock

systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *agriculture, Ecosystems and Environment*, 190, 4-8. DOI: 10.1016/j.agee.2013.08.009.

Lemaire G, Gastal F, Franzluebbers A, Chabbi A. 2015. Grassland cropping rotations: an avenue for agricultural diversification to reconcile high production with environmental quality, *Environment Management*, 56, 1065-1077. DOI: 10.1007/s00267-015-0561-6.

Leterme P, Nesme T, Regan J, Korevaar H. 2019. Environmental benefits of farm- and district-scale crop-livestock integration: an European perspective. In Lemaire G, de Faccio Carvalho PC, Kronberg S, Recous S (eds), *Agrosystem Diversity. Reconciling contemporary agriculture and environment quality*, Elsevier, Academic Press, London, 335-348. ISBN: 978-0-12-811050-8.

Martin G, Durand JL, Duru M, Gastal F, Julier B, Litrico I, Louarn G, Médiène S, Moreau D, Valentin-Morison D, Novak S, Parnaudeau V, Paschalidou F, Vertès F, Voisin AS, Cellier P, Jeuffroy MH. 2020. Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review, *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 17. DOI: 10.1007/s13593-020-00620-9.

Mazoyer M, Roudart L. 1997. *Histoire des agriculture du Monde. Du néolithique à la crise contemporaine*, Edition du Seuil, Paris, 705 p. ISBN: 978-2-02-053061-3.

Meiss H, Médiène S, Waldhardt R, Caneill J, Bretagnolle V, Reboud X, Munier-Jolain N. 2010a. Perennial alfalfa affects weed community trajectories in grain crop rotations, *Weed Research*, 50, 331-340. DOI: 10.1111/j.1365-3180.2010.00784.x.

Meiss H, Médiène S, Waldhardt R, Caneill J, Munier-Jolain N. 2010b. Contrasting weed species composition in perennial alfalfas and six annual crops: implications for integrated weed management, *Agronomy for Sustainable*

- Development*, 30, 657-666. DOI: 10.1051/agro/2009043.
- Mischler P, Martel G, Tresh P, Chartier N. 2020. L'association cultures et élevage : un moyen pour réduire l'usage des pesticides et une piste pour la reconception agroécologique de systèmes de productions agricoles, *Innovations agronomiques*, 80, 41-54. hal-03224312.
- Parsons AJ, Rowarth J, Thornley J, Newton J. 2011. Primary production of grasslands, herbage accumulation and use and impacts of climate change. In Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A (eds) *Grassland Productivity and Ecosystem Services*, CAB Int, Wallingford (UK), 3-18.
- Peyraud JL. 2011. The role of grasslands in intensive animal production in North-West Europe; conditions for a more sustainable farming system. In Lemaire G, Hodgson J, Chabbi A (eds) *Grassland Productivity and Ecosystem Services*, CAB Int., Wallingford, UK, 179-187.
- Riches N. 1967. *The Agricultural Revolution in Norfolk*, Frank Cass & Company Ltd (2nd ed), 194 p.
- Russelle MP, Entz MH, Franzluebbers AJ. 2007. Reconsidering integrated crop-livestock systems in North-America. *Agronomy Journal*, 99, 325-334.
- Schiere JB, Ibrahim MNM, van Keulen H. 2002. The role of livestock for sustainability in mixed farming: Criteria and scenario studies under varying resource allocation, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90, 139-153. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00176-1.
- Senthikumar K, Nesme T, Mollier A, Pellerin S. 2012. Conceptual design and quantification of phosphorus flows and balances at the country scale: The case of France, *Global Biogeochemical Cycles*, 26(2). DOI: 10.1029/2011GB004102.
- Soussana JF, Lemaire G. 2014. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 9-17. DOI: 10.1016/j.agee.2013.10.012.
- Sulc RM, Tracy BF. 2007. Integrated crop-livestock systems in the US Corn Belt. *Agronomy Journal*, 99, 335-345. DOI: 10.2134/agronj2006.0086.
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices, *Nature*, 418, 671-677. DOI: 10.1038/nature01014.
- Viaux P. 2023, Associer polyculture et élevage pour une fertilité à moindre coût. In *Une fertilité durable des sols agricoles*, Editions France Agricole, 195-216. ISBN 978-2-85557-833-0.
- Viglizzo EF, Carreño LV, Pereyra H, Ricard F, Clatt J, Pincén D. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. In Viglizzo EF, Jobbágy EG (eds) *Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental*. INTA, Buenos Aires, 9-16.

Édité par

Michel Dron

Rapporteurs

1. Anonyme
2. Anonyme

Rubrique

Cet article a été publié dans la rubrique « Revues et synthèse » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*.

Reçu

24 octobre 2022

Accepté

8 septembre 2023

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of agriculture
(N3AF)

Revues et synthèses

Publié

11 décembre 2023

Citation

Lemaire G. 2023. L'intégration entre cultures et élevage des herbivores reste la base d'une agriculture à la fois productive et durable/Crop-herbivore livestock integration systems as the basis for an agriculture both productive and sustainable, *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of agriculture (N3AF)*, 16(11), 1-18. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a667071>.



Gilles Lemaire est directeur de recherche honoraire INRAE, membre de l'Académie d'agriculture de France.