



La revue francophone sur les fourrages et les prairies

The French Journal on Grasslands and Forages

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

Pour toute recherche dans la base de données et
pour vous abonner :

www.afpf-asso.fr

Une agriculture intégrant pleinement les fourrages pour reconnecter culture et élevage, améliorer la circularité et favoriser les services écosystémiques

A. Franzluebbers¹, G. Martin²

RESUME

L'agriculture a connu des changements technologiques et culturels majeurs au cours du siècle dernier. Beaucoup diraient que ces changements ont été incontestablement positifs, avec d'énormes gains de productivité, une réduction des besoins en main-d'œuvre et une diminution de l'insécurité alimentaire pour une majorité de la population. Cependant, le développement d'exploitations agricoles de plus en plus spécialisées et la déconnexion induite entre culture et élevage a également eu des conséquences négatives qui se sont traduites par (a) le déclin de la biodiversité, (b) la dégradation des eaux souterraines et de surface par des polluants agrochimiques, (c) la dégradation de la qualité des sols, notamment due à leur perturbation mécanique fréquente, (d) des émissions élevées de gaz à effet de serre provenant à la fois de systèmes de culture spécialisés très dépendants d'intrants et de systèmes d'élevage intensifs qui concentrent les rejets d'effluents, et (e) un manque d'intégrité écologique entre les composantes de ces systèmes spécialisés. Les systèmes agricoles diversifiés utilisant des fourrages annuels et pérennes offrent la possibilité d'accroître les synergies écologiques entre les systèmes de culture et d'élevage. Les systèmes culture-élevage intégrés peuvent boucler le cycle des nutriments, réguler naturellement les adventices, les insectes et les maladies, et partager les ressources selon une logique d'agroécosystème circulaire. Les couverts végétaux pourraient être utilisés comme des fourrages annuels pâturés dans les exploitations actuellement spécialisées en cultures, en mettant en place des mécanismes incitatifs adaptés. Les fourrages pérennes en rotation avec les cultures ont une pertinence historique et sont une pratique éprouvée pour conserver les nutriments, améliorer la santé des sols et conserver voire renforcer la biodiversité. La transformation de l'agriculture par l'intégration culture-fourrage-élevage pourrait réduire considérablement l'érosion des sols, améliorer la qualité de l'eau et la santé des sols. Nous suggérons que l'intégration de différents types de fourrages dans un paysage peut améliorer donc la durabilité de l'agriculture et son intégrité écologique.

SUMMARY

Farming with forages can reconnect crop and livestock operations to enhance circularity and foster ecosystem services

Agriculture has undergone dramatic technological and cultural changes over the past century. Many would argue that the changes have been unquestionably positive with huge gains in productivity, reduced labor requirements, and alleviation of food insecurity for most people. However, the adoption of increasingly specialized and separated crop and livestock enterprises has also had widespread negative consequences resulting in (a) decline in biodiversity, (b) degradation of groundwater and surface waters with agrochemical pollutants, (c) poor soil health with monoculture crop production and frequent soil disturbance, (d) intensive greenhouse gas emissions from both specialized cropping systems relying on external inputs and concentrated animal feeding operations that accumulate wastes, and (e) general lack of ecological integrity among components of these specialized systems. Diversified agricultural systems using annual and perennial forages offer opportunities to elevate ecological synergies when crop and livestock operations are integrated. Integrated crop-livestock systems can internalize nutrient cycling, culturally control weed, insect, and diseases, and share resources in a circular-based agroecosystem. Cover crops could be transitioned into nutritious annual forages for livestock grazing on currently specialized crop production farms with appropriate local incentives. Perennial forages in ley farming or in pasture-crop rotations have historical relevance and are a proven practice to conserve nutrients, improve soil health, and enhance biodiversity. Redesigning contemporary agriculture with mixed-use farming techniques could greatly reduce soil erosion, improve water quality, and invigorate soil health. We suggest that incorporating different types of forages across a diverse landscape can enhance agricultural sustainability and ecological integrity.

AUTEURS

1 : United States Department of Agriculture (USDA) – Agricultural Research Service, 101 Derieux Place, Raleigh, North Carolina 27695 USA, alan.franzluebbers@usda.gov;

2 : AGIR, Université de Toulouse, INRAE, Castanet-Tolosan, France, guillaume.martin@inrae.fr

MOTS-CLES : Intégrité écologique ; Qualité environnementale ; Fourrage ; Pâturage ; Polyculture-élevage ; Prairie pérenne.

KEY-WORDS: Ecological integrity; Environmental quality; Forages; Grassland; Grazing; Integrated crop-livestock systems; Perennial pasture

REFERENCE DE L'ARTICLE : Franzluebbers A., Martin G., (2023). « Une agriculture intégrant pleinement les fourrages pour reconnecter culture et élevage, améliorer la circularité et favoriser les services écosystémiques ». *Fourrages* 253, 87-92

Cet article a été publié en anglais dans la revue *Grass and Forage Science* (Volume 77, Issue 4), et traduit en français pour la revue *Fourrages*, avec l'aimable autorisation des auteurs et de la revue *Grass and Forage Science*.

Article d'origine : Franzluebbers, A. J., & Martin, G. (2022). Farming with forages can reconnect crop and livestock operations to enhance circularity and foster ecosystem services. *Grass and Forage Science*, 77 (4), 270– 281. <https://doi.org/10.1111/gfs.12592>

La production agricole est un élément essentiel de nos civilisations depuis des milliers d'années (Lal *et al.*, 2007). Au cours du siècle dernier, l'agriculture des pays industrialisés est passée rapidement de systèmes agricoles diversifiés à une spécialisation extrême. Les conséquences négatives que ce changement a eu sur l'environnement exigent de prendre du recul sur nos choix sociétaux et de réfléchir à l'avenir. Cet article propose un point de vue sur (a) l'histoire récente de l'agriculture aux États-Unis et en France, deux pays industrialisés de premier plan, (b) l'état actuel de l'agriculture, en mettant l'accent sur plusieurs des problèmes majeurs associés aux systèmes agricoles spécialisés, et (c) quelques solutions potentielles reposant sur une transformation de l'agriculture vers une amélioration de ses performances environnementales, cela sans perdre de vue les exigences de production. Nous suggérons que les fourrages destinés à alimenter les animaux ruminants ou à produire des engrais verts pour alimenter les sols sont essentiels pour une agriculture écologiquement fonctionnelle. Cela passe aussi par l'intégration entre les systèmes de culture et d'élevage afin d'accroître leur intégrité écologique grâce à l'amélioration du cycle des nutriments, de la santé des sols, et la conservation voire le renforcement de la biodiversité. Si la nécessité d'une transformation des systèmes agricoles est désormais reconnue (NRC, 2010 ; Franzluebbers *et al.*, 2020 ; Jackson *et al.*, 2020), il convient de concevoir de tels systèmes pour une diversité d'écorégions. Nous ne prétendons pas avoir une solution universelle, et nous ne pouvons pas non plus présenter une liste exhaustive de systèmes idéaux, mais nous illustrons comment les fourrages annuels et pérennes peuvent jouer un rôle important dans les systèmes agricoles plus durables de demain. Les agronomes fourragers vont devoir travailler aux côtés de pédologues, de phytogénéticiens, de zootechniciens, d'ingénieurs, de nutritionnistes et de spécialistes des réseaux sociaux pour concevoir une

diversité de systèmes intégrant culture, fourrage et élevage spécifiques à chaque écorégion afin de trouver un équilibre entre productivité et performances environnementales.

1. Histoire récente de l'agriculture

Les systèmes agricoles modernes et industrialisés sont devenus hautement spécialisés pour se concentrer sur les économies d'échelle en maximisant l'efficacité de la production agricole par une minimisation des besoins en travail humain (Allen, 1988). Cette stratégie a été déployée dans les pays industrialisés tant pour les systèmes de production végétale que pour les systèmes de production animale. Aux États-Unis, cette spécialisation a commencé lentement avec le passage du travail manuel à la traction animale après la guerre de Sécession et s'est accéléré avec le passage de la traction animale à la traction mécanique et l'adoption de produits chimiques issus de combustibles fossiles après la Seconde Guerre mondiale (Rasmussen, 1962). En Europe, l'agriculture à l'aide d'animaux de traits a été pratiquée pendant des siècles avant le développement des moteurs à vapeur et à combustion. Les réserves de combustibles fossiles bon marché, la fabrication abondante et peu coûteuse d'engrais de synthèse, le développement rapide de la mécanisation, les améliorations génétiques des plantes et des animaux et la compréhension scientifique des processus nécessaires pour maximiser la productivité sont autant de facteurs qui ont contribué à ce passage relativement récent (dans l'histoire de l'agriculture) à l'agriculture spécialisée (Steiner & Franzluebbers, 2009). À la suite de ces améliorations axées sur la production, et d'une évolution vers la spécialisation dans la production végétale ou animale uniquement, la démographie agricole a évolué vers une diminution du nombre d'exploitations (Figure 1), accompagnée d'une augmentation de la production par exploitation. La taille

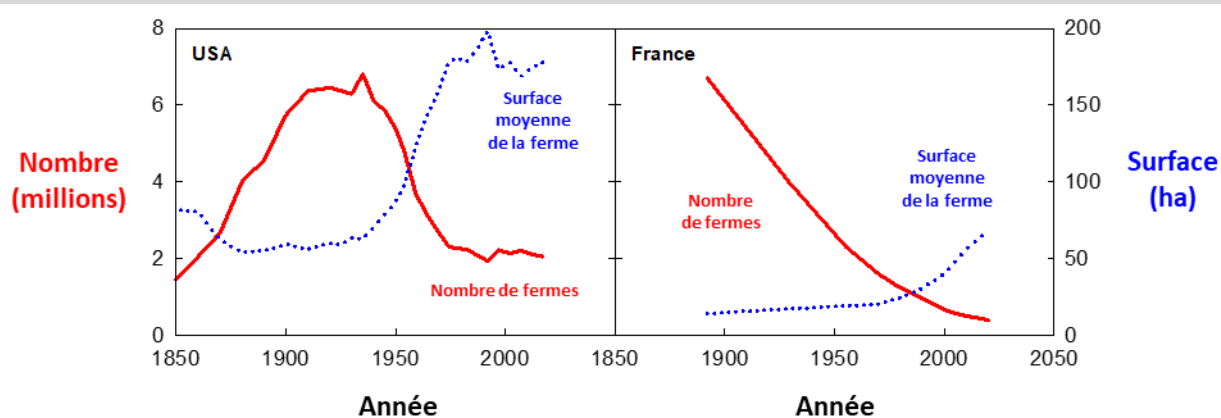


FIGURE 1 : Nombre d'exploitations (ligne continue) et taille (en ha) moyenne des exploitations (ligne pointillée) sur une période de 200 ans aux États-Unis (gauche) et en France (droite). Données provenant de l'USDA-NASS (2020) et d'Agreste (2022).

Figure 1 : Number of farms (solid line) and average size of farm (dotted line) during a 200-year period in the United States (left panel) and in France (right panel). Data from USDA-NASS (2020) and Agreste (2022).

moyenne d'une exploitation agricole aux États-Unis a plus que triplé depuis le début du 20^e siècle, et un changement de même ampleur s'est produit en France (Figure 1). En France, le nombre d'exploitations de polyculture-élevage a diminué, passant de 55 800 en 2000 à 36 600 en 2016 (INSEE, 2020), tandis que le nombre d'exploitations spécialisées en culture a augmenté de 49 500 à 61 500 au cours de la même période (INSEE, 2020).

Aux États-Unis, en 1964, 26 % des exploitations étaient très petites (<20 ha), 69 % des exploitations étaient de taille moyenne (20-400 ha) et 5 % des exploitations étaient grandes (>400 ha) (USDA-NASS, 2020). En 2017, ces proportions de fermes étaient de 42, 49 et 9 % respectivement. Par conséquent, les exploitations de taille moyenne ont été remplacées par des exploitations de petite et grande taille. Un changement relativement similaire dans la distribution de la taille des exploitations s'est produit en France, où la proportion de petites exploitations a régulièrement diminué, passant d'environ 90 % en 1892 à moins de 50 % en 2010, tandis que les proportions d'exploitations de taille moyenne et grande ont régulièrement augmenté. Parallèlement à cette évolution de la taille des exploitations, les surfaces fourragères et pâturées des exploitations historiquement diversifiées ont diminué. C'est ce que laissent penser les données de cinq États du sud-est des États-Unis (Alabama, Géorgie, Caroline du Sud, Caroline du Nord et Virginie), dans lesquels 23,3 Mha de terres agricoles n'étaient pas cultivées en 1920 (c'est-à-dire vraisemblablement des prairies et des zones boisées), pour tomber à 14,8 Mha en 1969 et à 7,9 Mha en 2017 (USDA-NASS, 2020). Une tendance similaire s'est produite en France, où les prairies permanentes sont passées de 13 Mha en 1960 à 9 Mha en 2010, et les prairies semées à base de légumineuses [luzerne (*Medicago sativa*), trèfle, sainfoin (*Onobrychis viciifolia*)] de ~3,5 Mha dans les années 1960 à moins de 0,3 Mha en 2010 (Agreste, 2021).

Aux États-Unis, les effectifs de bétail des exploitations agricoles ont augmenté de façon spectaculaire au cours du siècle dernier (Franzluebbers *et al.*, 2021). Une évolution similaire s'est produite en France. Aux États-Unis, les effectifs moyens de bovins laitiers sont passés de 13 têtes par exploitation en 1964 à 175 têtes en 2017. Les effectifs moyens de porcs sont passés de 37 têtes par exploitation en 1964 à 1089 têtes en 2017. Les effectifs moyens de poulets de chair par exploitation sont passés de 162 en 1964 à 1584 en 2017. Le système de production de viande bovine aux États-Unis comporte trois phases distinctes, de la naissance à l'abattage, avec des exploitations de naissance réparties dans tout le pays, l'engraissement au pâturage des veaux sevrés dans tout le sud et l'est des États-Unis, et la finition en parc d'engraissement dans la région des Grandes Plaines (Franzluebbers *et al.*, 2011). Par conséquent, certaines parties du système de production de viande bovine sont distribuées géographiquement et à petite échelle, mais la phase de finition est généralement très concentrée géographiquement et très spécialisée. La structuration géographique de la filière est similaire en Europe où les veaux maigres produits en France sont expédiés en Italie pour y être engraisés.

La répartition du nombre de têtes de bétail par exploitation aux États-Unis illustre la tendance d'agrandissement des exploitations. Cependant, il existe un grand nombre de petites exploitations qui pourraient permettre de retrouver un système agricole plus diversifié et intégré. Par exemple, l'effectif moyen des poules pondeuses à travers les États-Unis a été relativement constant, soit 359,5 millions en 1920 et 368,2 millions en 2017 (USDA-NASS, 2020). Le nombre actuel d'exploitations possédant de petits effectifs de poules pondeuses domine largement le paysage agricole, et pourtant la majorité des poules pondeuses est élevée par une proportion relativement faible des exploitations (Figure 2).

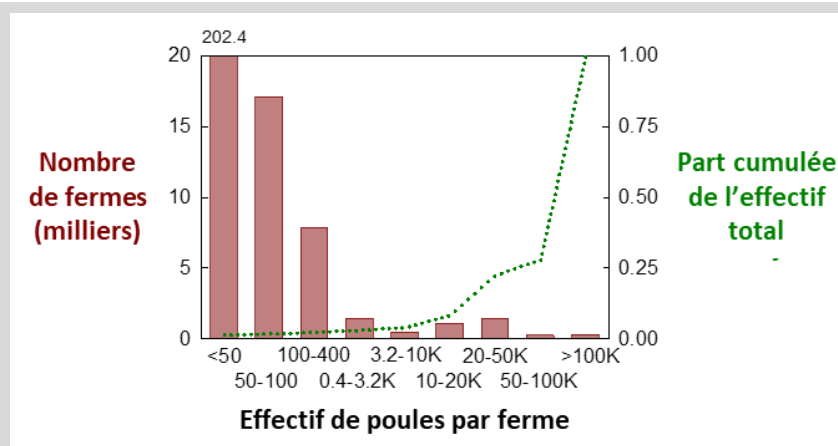


FIGURE 2 : Nombre d'exploitations ayant des poules pondeuses (barres) et part cumulée de l'effectif total (ligne pointillée) en fonction des classes d'effectif par ferme en 2017 aux États-Unis. Données provenant de l'USDA-NASS (2020).

Figure 2 : Number of farms having layer hens (bars) and cumulative fraction of inventory (dotted line) as affected by inventory size classification in 2017 in the United States. Data from USDA-NASS (2020).

2. L'agriculture contemporaine

Aux États-Unis, la plupart des agriculteurs gèrent de petites surfaces de cultures et de petits troupeaux. Mais le secteur agricole est dominé par une minorité de grandes exploitations agricoles spécialisées, que ce soit dans la production végétale ou animale. Par exemple, 80 % des 12 Tg de viande bovine aux États-Unis sont transformés par quatre entreprises. Bien que la production de céréales soit largement répartie dans le Midwest et les Grandes Plaines des États-Unis, les entreprises de commercialisation et de transformation des céréales se sont développées au fil du temps, si bien que 80 % des >100 Tg de soja (*Glycine max*) sont transformés par quatre entreprises seulement et qu'une part importante (25 à 50 %) des céréales est transformée par quatre entreprises (www.census.gov). En France, on assiste également à un phénomène de consolidation du secteur agricole : 151 coopératives collectent 70 % des céréales produites, le reste étant collecté par des sociétés privées. Deux grands transformateurs de viande contrôlent chacun 20 % du marché et de nombreuses petites entreprises se partagent le reste, bien que l'industrie continue de se concentrer dans 13 coopératives. Le choix du type d'exploitation et de sa taille est toujours fait par les agriculteurs aux États-Unis et en France, mais les tendances sectorielles, les incitations économiques ou leur absence, et la reconnaissance par l'industrie, la recherche et le développement comme leur organisation consolident ces tendances à la spécialisation.

L'agriculture spécialisée semble exercer une influence politique importante. C'est peut-être l'une des raisons pour lesquelles les politiques publiques continuent de favoriser les modes de production industriels et spécialisés sans accorder suffisamment d'attention à l'agroécologie. Les politiques sont plus faciles à mettre en œuvre lorsqu'elles portent sur un nombre réduit d'exploitations, surtout si l'on ignore les coûts indirects de cette spécialisation sur la santé humaine, la pollution environnementale et la dégradation de l'intégrité écologique. En Europe, il arrive que les industriels de l'agroalimentaire fassent pression contre des politiques qu'ils désapprouvent, par exemple celles en faveur de l'amélioration du bien-être animal ou de l'intégrité de l'environnement (Swinnen *et al.*, 2021), et peuvent même menacer de délocaliser leurs activités ailleurs. Face à la demande de réduction des pollutions liées aux activités d'élevage industriel confiné, les grandes exploitations industrielles réagissent souvent en se spécialisant encore plus et en adoptant des solutions technocentrées. Par exemple, aux États-Unis, les déjections animales sont souvent retenues dans un bassin de sédimentation et épandues sur les parcelles alentours. La solution à court terme pour redistribuer les nutriments solubles et réduire le volume d'eau dans le bassin est d'irriguer par aspersion les cultures ou les fourrages, mais le sort des résidus solides décantés dans ces bassins reste à clarifier, et

n'est pas nécessairement pris en compte à grande échelle car la plupart sont des bassins relativement récents qui n'ont pas encore atteint leur capacité de stockage de ces résidus solides. En France aussi, les solutions technocentrées deviennent dominantes dans les débats publics sur l'agriculture, par exemple avec l'édition du génome des plantes et des animaux, la robotique, *etc.* (Hannachi & Tichit, 2016). Les solutions low-tech basées sur l'intelligence collective et fondées sur la nature ne sont pas autant promues, malgré la reconnaissance des bénéfices conjoints de l'agroécologie sur la production agricole et l'intégrité environnementale (Lampkin *et al.*, 2022).

L'efficacité et le résultat économique des exploitations agricoles spécialisées basées sur les technologies sont considérés comme élevés (Capper *et al.*, 2009), en particulier lorsque ces technologies coûteuses peuvent être financées par des prêts à faible taux, peuvent être amorties sur des années et que leurs impacts environnementaux sont externalisés. Les politiques publiques visant à implanter des infrastructures de collecte et transformation à proximité des exploitations agricoles sont souvent présentées comme des opportunités de créations d'emploi favorables aux populations locales. Le public n'est généralement pas très conscient des conditions de travail difficiles qui y règnent et les consommateurs privilégient en majorité un approvisionnement alimentaire à bas prix. Cependant, les exploitations agricoles industrielles ont de graves impacts sur l'environnement et la santé des populations (Anomaly, 2014 ; Smith, 2019). Lorsqu'elles y sont contraintes, ces grandes exploitations évitent les pertes de nutriments dans l'environnement en stockant les effluents dans des bassins de sédimentation. Les émissions d'ammoniac provenant de ces bassins correspondent à une part faible mais significative de l'azote ingéré par les troupeaux laitiers (Leytem *et al.*, 2018). Ces bassins provoquent des émissions de gaz à effet de serre importantes et des méthaniseurs ou des fosses couvertes seraient nécessaires pour éviter ces émissions. En outre, des risques de catastrophes naturelles existent, car ces installations sont sujettes à des défaillances (Calhoun & Cecala, 2021). Les fuites dans l'environnement à la suite d'ouragans, de tornades et d'inondations peuvent être dévastatrices (Harmin, 2015). Enfin, l'émission d'odeurs par les élevages industriels confinés peut constituer une source de déclin des populations rurales.

Le bien-être des animaux dans les élevages industriels confinés est un sujet qui fait débat, car leurs logements offrent un confort alimentaire et environnemental que les espaces ouverts n'offrent pas, et pourtant les déplacements et l'exploration du milieu sont entravés (Mellor, 2015). Le bien-être des agriculteurs est un autre sujet d'importance dans cette transition de systèmes agricoles intégrés à des systèmes spécialisés. En Europe, l'agriculture est un secteur d'activité qui connaît un taux de suicide parmi les plus

élevés. Le taux de suicide des agriculteurs français est 20 % plus élevé que celui de la population, et 30 % plus élevé pour les éleveurs de bovins laitiers (Santé Publique France, 2018). Les organisations non gouvernementales axées sur l'écologie gagnent en popularité et le secteur de l'élevage subit une pression croissante pour changer. Le modèle industriel est probablement au bord de la catastrophe avec les menaces de perturbations environnementales, pandémiques et géopolitiques. Ce n'est certainement pas la vision idyllique de l'agriculture que beaucoup de gens ont pu envisager. Il doit exister une autre façon de faire...

3. Reconnaître le besoin de changement

Une économie circulaire, durable pour tous les secteurs d'activité, reconnaît que chaque composant a une valeur intrinsèque et que la production ne peut pas être le seul résultat d'importance (Russelle *et al.*, 2007 ; Francis *et al.*, 2014 ; Jones *et al.*, 2021). L'agroécologie, en tant qu'élément d'une économie circulaire, peut être étendue à l'ensemble du système alimentaire au-delà de la ferme, dans les paysages et les territoires ruraux (Francis *et al.*, 2003). Un système agroécologique a de nombreux composants servant une ou plusieurs fonctions, et les valeurs extrinsèques de ces composants doivent être considérées en plus de la valeur intrinsèque de la production agricole. Un système basé sur

l'agroécologie aura des entrées et des sorties équilibrées qui peuvent conduire à un fonctionnement relativement stable dans le temps. De manière plus complexe, les composants qui peuvent être négligés dans un agroécosystème industriel peuvent être considérés comme nécessaires au bon fonctionnement d'un système agroécologique. Dans les systèmes agroécologiques, l'accent est mis sur des variables qui évoluent lentement (par exemple, la teneur en matière organique du sol, les fluctuations saisonnières des échanges gazeux dans l'atmosphère, les connaissances de l'agriculteur) et qui déterminent la capacité du système à répondre aux perturbations à court et à long terme (Moraes *et al.*, 2014), alors que l'agriculture industrielle se concentre principalement sur des variables dites rapides (par exemple, l'azote disponible pour les plantes, le nombre de parasites par unité de surface). Dans ce qui suit, nous explorerons certaines de ces fonctions des systèmes agroécologiques par l'intégration culture-fourrage-élevage. Accorder de la valeur à toutes les composantes d'un système agricole permet à ce dernier de fonctionner efficacement pour atteindre des objectifs productifs, environnementaux et sociaux en phase avec la durabilité de l'agriculture (Lemaire *et al.*, 2014).

Les fourrages et les produits dérivés des prairies et des surfaces pâturées, lorsqu'ils sont intégrés à d'autres composantes de la production agricole, contribuent à un système de production sain et circulaire (Tableau 1). Par

Propriété ou processus	Référence
Produire à la ferme pour réduire les coûts de production/les intrants	Lebacqz <i>et al.</i> (2015)
Fournir du fourrage de valeur nutritive élevée pour le bétail au pâturage	Lee (2018)
Fournir du fourrage pendant des saisons ciblées	Cosentino <i>et al.</i> (2013)
Produire une diversité de composés biochimiques végétaux	Provenza <i>et al.</i> (2003)
Fixer de l'azote par les légumineuses	Rasmussen <i>et al.</i> (2012)
Contrôler l'érosion du sol	Fullen (1998)
Couvrir continuellement le sol de plantes vivaces	Gyssels <i>et al.</i> (2005)
Alimenter le biote du sol avec des résidus de surface	Seaton <i>et al.</i> (2022)
Favoriser le développement des racines et leur décomposition pour stocker du carbone	Triberti <i>et al.</i> (2016)
Favoriser un système racinaire étendu qui nourrit le biote du sol	Porazinska <i>et al.</i> (2003)
Améliorer l'infiltration de l'eau	Wu <i>et al.</i> (2011)
Réduire l'évaporation de l'eau du sol	Dong <i>et al.</i> (2015)
Maintenir les mares vernaies	Pyke & Marty (2005)
Réduire les pertes de nutriments	Garnier <i>et al.</i> (2016)
Favoriser la formation d'agrégats stables dans l'eau	Franzluebbers <i>et al.</i> (2000)
Améliorer le stockage du carbone dans le sol	Triberti <i>et al.</i> (2016)
Soutenir les bactéries oxydant le méthane dans le sol	Liu <i>et al.</i> (2022)
Soutenir la présence de bactéries consommatrices d'oxyde nitreux dans le sol	Glatzel & Stahr (2001)
Promouvoir des populations microbiennes du sol propices au développement des mycorhizes ou des composés favorisant la croissance des plantes	Khambani <i>et al.</i> (2019)
Héberger une diversité de communautés microbiennes du sol pour supprimer les pathogènes du sol	Ampt <i>et al.</i> (2019)
Supprimer l'émergence des adventices	Meiss <i>et al.</i> (2010)
Soutenir la lutte biotique contre les parasites	Léchenet <i>et al.</i> (2016)
Abriter les pollinisateurs	Shackelford <i>et al.</i> (2013)
Fournir un habitat pour les oiseaux	Davis <i>et al.</i> (2013)
Fournir un habitat de la faune sauvage / pâturage	Schieltz & Rubenstein (2016)
Fournir un habitat pour les insectes et les vers de terre	Hendrickx <i>et al.</i> (2007)
Améliorer la circulation des équipements	Droogers <i>et al.</i> (1996)

TABLEAU 1 : Avantages potentiels des fourrages intégrés aux cultures dans divers systèmes agricoles.
Table 1 : Potential benefits of forages integrated with crops in diverse agricultural systems.

le passé, les rotations longues cultures-prairies étaient courantes en Europe pour préserver les sols, réduire la pression exercée par les ravageurs sur les cultures et améliorer la disponibilité des nutriments par l'accumulation de matière organique (Fullen *et al.*, 2006 ; Johnston *et al.*, 2017). Les rotations cultures-prairies peuvent également conduire à une production alimentaire durable satisfaisant les besoins des populations tout en fournissant des services écosystémiques qui sont nécessaires pour faire face aux menaces du changement climatique (Franzluebbbers *et al.*, 2014). Ces services écosystémiques offerts par une approche agroécologique intégrant culture, fourrage et élevage réduiront les émissions de gaz à effet de serre, les impacts de l'agriculture sur la qualité de l'eau, l'érosion des sols et de la biodiversité (Martin *et al.*, 2020). Par conséquent, les systèmes agricoles intégrés qui s'appuient sur les processus naturels de recyclage des nutriments, la capture abondante de l'énergie solaire pour alimenter les processus en jeu au sein de l'écosystème, l'activité biologique du sol pour promouvoir sa santé et purifier l'eau, et les interactions biotiques avec l'environnement pour contrôler les parasites et les maladies, sont fondamentaux pour produire plus durablement en agriculture (Franzluebbbers, 2007).

Les services écosystémiques sont les bénéfices offerts aux sociétés humaines par les écosystèmes, ainsi qu'à tous les autres organismes vivants de la biosphère. Le Millennium Ecosystem Assessment (2005) indique que "l'espèce humaine, bien que protégée des changements environnementaux par la culture et la technologie, est fondamentalement dépendante des services écosystémiques". La recherche se concentre sur des indicateurs décrivant la manière dont les services écosystémiques sont affectés par le large éventail de pratiques de conservation et de conditions environnementales dans le monde. Ces indicateurs décrivent les processus / fonctions clés des écosystèmes, tels que (1) un bouclage des cycles des nutriments avec des pertes minimales dans l'environnement, (2) l'utilisation efficace de l'eau douce disponible en harmonie avec la nature, (3) la promotion de la production à l'échelle de la parcelle et de la biodiversité à l'échelle du paysage, et (4) les opportunités d'engagement et de prospérité des populations rurales à long terme.

3.1. Vers une agriculture circulaire

La nature a une capacité inhérente à revenir aux rythmes des cycles naturels. Lorsque le sol est nu, une diversité de plantes est recrutée pour panser ses plaies. Lorsque les nutriments inorganiques sont épuisés dans le sol, leur absorption par les plantes et la décomposition de ces plantes créent un cycle organique qui limite les pertes supplémentaires. La restauration de l'intégrité écologique permettant de couvrir le sol et de réduire l'érosion est possible dans les systèmes agricoles

soumis à des perturbations limitées, à condition qu'il demeure une capacité minimale de régénération des communautés végétales et animales. Au fil du temps, cette intégrité écologique peut être entièrement restaurée par des processus naturels. En début de succession, les graminées et les herbacées peuvent jouer un rôle essentiel dans ce processus de restauration, même dans les environnements humides où les communautés d'espèces forestières sont au climax.

L'évolution relativement récente de l'histoire humaine vers la spécialisation en culture ou en élevage et la pratique de la monoculture n'aurait probablement jamais dû être considérée comme durable, mais l'utilisation intensive d'engrais, de pesticides et d'antibiotiques a permis à ce modèle de surmonter ses carences écologiques. Aujourd'hui, on s'intéresse de plus en plus à des systèmes agricoles plus diversifiés qui s'appuient sur la nature réparatrice des fourrages et des systèmes intégrant culture et fourrage vis-à-vis des services écosystémiques (Sollenberger *et al.*, 2019 ; Jackson, 2022 ; Smith *et al.*, 2022).

Historiquement, les ateliers de culture se sont appuyés sur l'élevage pour assurer la fertilité grâce aux fumiers et à la rotation avec des prairies semi-pérennes, c'est-à-dire un système culture-fourrage-élevage permettant d'atteindre un quasi-équilibre entre la production et la respiration sur la durée de la rotation (Billen *et al.*, 2010). En fait, il existe des preuves à partir de macro-restes végétaux que les céréales, les prairies des zones humides et boisées et les jachères étaient présentes ensemble entre 2920 et 2620 avant notre ère aux Pays-Bas (Kooistra, 2008). Dans la zone méditerranéenne du sud de la France, des preuves datant du 5^e au 12^e siècle de notre ère suggèrent que l'agriculture était mixte, combinant céréales, oléagineux, légumineuses, vignes et fruits avec des zones humides et des prairies (Ruas, 2005). Ferdière (2021) a identifié les premiers cas de spécialisation (production de vin dans la région de Narbonne) en Gaule romaine, bien que la pratique d'une agriculture diversifiée ait été largement la règle à cette époque, comme la pratique de la rotation des cultures et des engrais verts. L'avènement de la mondialisation du commerce des denrées alimentaires et des aliments pour le bétail à l'ère industrielle a gravement modifié les bilans nutritifs de nombreux pays dans le monde (Galloway *et al.*, 2007).

Comment devrions-nous utiliser les fourrages et les prairies dans une nouvelle ère de systèmes agricoles à haute productivité ? Nous n'envisageons pas de revenir aux systèmes traditionnels à faible productivité à l'aube d'une nouvelle ère de systèmes intégrés culture-fourrage-élevage. Nous avons à notre disposition de nombreuses solutions modernes, telles que l'agriculture de conservation du sol (Moraes *et al.*, 2014 ; Ribeiro *et al.*, 2020), les légumineuses fortement fixatrices d'azote (Anglade *et al.*, 2015 ; Schultze-Kraft *et al.*, 2018), et la

disponibilité de nombreux amendements organiques (Thangarajan *et al.*, 2013 ; Wuest *et al.*, 2013), qui peuvent maintenir la productivité à des niveaux élevés, mais surtout qui peuvent être utilisés pour minimiser la dégradation de l'environnement et améliorer l'intégrité écologique des paysages agricoles (Kremer & Hezel, 2013 ; Obriot *et al.*, 2016). Une conséquence de cette approche intégrée sera de permettre des communautés rurales plus dynamiques grâce à une diversité des pratiques agricoles fournissant un équilibre entre la productivité et la qualité de l'environnement (Nicholls & Altieri, 2018 ; López-García *et al.*, 2021).

Quelques exemples de réussites des approches agroécologiques sont brièvement résumés ici afin d'illustrer le potentiel de plus grands bénéfices avec les premiums de prix biologiques et d'un meilleur rendement grâce aux avantages de la rotation. Dans la région de Palouse, dans le nord-ouest des États-Unis, la culture de céréales biologiques après une luzerne a permis d'obtenir une meilleure marge sur charges opérationnelles (615 \$ ha⁻¹ an⁻¹) qu'une rotation conventionnelle typique (477 \$ ha⁻¹ an⁻¹), malgré les piètres résultats du quinoa (*Chenopodium quinoa*) (Wiema *et al.*, 2020). Les auteurs ont suggéré que des progrès dans la lutte biologique contre les adventices et le développement de variétés de quinoa adaptées à la région pourraient contribuer à réduire le risque pour les agriculteurs qui tentent de diversifier leur système de culture. L'intégration d'une légumineuse fourragère comme la luzerne dans la rotation était cruciale pour la performance économique et agronomique de ces systèmes de culture biologique en zone sèche. Dans le Midwest américain, les systèmes de culture plus diversifiés qui incluaient des fourrages dans la rotation [maïs-soja-céréale-luzerne] ont des rendements et des bénéfices égaux ou supérieurs à ceux des rotations plus simplifiées, malgré la réduction des intrants agrochimiques (Davis *et al.*, 2012). Les adventices sont efficacement supprimées et l'écotoxicité des systèmes plus diversifiés est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celle du système conventionnel. Dans le sud-est des États-Unis, sur des terres qui étaient auparavant des prairies permanentes, la production de céréales d'été (sorgho ou maïs) était plus importante tant en grain qu'en résidus de culture en semis direct qu'en semis conventionnel, mais la production de céréales d'hiver (blé) n'était pas affectée par le mode de travail du sol (Franzluebbbers & Stuedemann, 2007). Les couverts végétaux d'hiver et d'été étaient plus productifs en semis direct qu'en semis conventionnel, ce qui montre que les technologies modernes qui préservent la matière organique du sol peuvent accentuer les avantages des systèmes intégrés. Ces couverts de seigle (*Secale cereale*) en hiver et de millet perlé (*Pennisetum glaucum*) en été ont fourni une alimentation abondante et de haute qualité aux veaux d'un an ou aux couples vache-veau pendant 26 à 77 jours au début du printemps et en été. Le gain des veaux sur les couverts végétaux était de 250 +/- 97 kg ha⁻¹ en semis direct, ce qui était en moyenne

21 % plus élevé qu'en semis conventionnel. La marge nette sur charges opérationnelles était plus élevée avec le pâturage des couverts végétaux, avec une moyenne de -63 \$ ha⁻¹ sans pâturage et de 302 \$ ha⁻¹ avec pâturage.

Chaque écorégion possède un ensemble de caractéristiques déterminantes à partir desquelles des pratiques agricoles particulières seront possibles (Bell *et al.*, 2014 ; Moraes *et al.*, 2014 ; Peyraud *et al.*, 2014 ; Sulc & Franzluebbbers, 2014). Toutes les pratiques agricoles ou combinaisons de pratiques ne seront pas possibles dans tous les environnements. Tous les modes de gestion ne seront pas acceptables dans toutes les communautés rurales. Par conséquent, faire correspondre la génétique des espèces végétales et animales dans un contexte particulier nécessite des modes de gestion tenant compte du contexte économique local, ainsi que du patrimoine culturel des communautés rurales. Ces facteurs sont pris en compte dans la plateforme de recherche G x E x C x SST (génotype x environnement x conduite x système socio-technique) (<https://agroinformatics.org/>). Dans certaines régions, les systèmes intégrés culture-fourrage-élevage pourraient déployer le pâturage bovin de couverts végétaux hivernaux pour consommer des fourrages de haute qualité à un moment où les prairies offrent peu de biomasse disponible. Cela contribuerait à maintenir les surfaces de cultures productives et avec suffisamment de résidus en surface en utilisant le semis direct pour favoriser une meilleure santé du sol et un recyclage efficace des nutriments (Sulc & Franzluebbbers, 2014). Dans d'autres régions, les prairies semi-pérennes peuvent être nécessaires pour fournir du fourrage au bétail, et entrer en rotation avec les cultures afin de bénéficier de l'amélioration de la santé du sol grâce à l'accumulation de matière organique pendant la phase en prairie, du recyclage des nutriments pour la phase de culture, ainsi que pour réduire les problèmes d'adventices et de parasites pendant les phases de culture (Martin *et al.*, 2020). Dans d'autres régions peuvent se mettre en place des collaborations entre agriculteurs spécialisés en culture et éleveurs, notamment pour raisonner l'épandage des effluents en évitant les pollutions dans les zones sensibles des bassins versants (Ryschawy *et al.*, 2017). Des exemples de ces approches sont décrits dans la section suivante en se concentrant sur les caractéristiques clés qui peuvent modifier les résultats en matière de productivité, de rentabilité, de qualité environnementale et/ou d'intégrité écologique.

3.2. Pâturage de couverts végétaux

Le mouvement pour la santé des sols aux États-Unis a mis en lumière l'intérêt des couverts végétaux (Wood & Bowman, 2021), ainsi que leur plus grande mise en œuvre (Dunn *et al.*, 2016), en particulier dans l'est des États-Unis (Bastos-Martins *et al.*, 2021). Parallèlement à cela, plusieurs revues de la littérature ont montré les impacts positifs des couverts végétaux

sur les propriétés et les processus du sol (Schipanski *et al.*, 2014 ; Poeplau & Don, 2015 ; Farmaha *et al.*, 2022). Plus récemment, quelques études pluriannuelles ont été lancées et peuvent maintenant donner un aperçu des possibles impacts négatifs et positifs à attendre du pâturage des couverts végétaux sur la productivité, le sol et l'environnement. Plusieurs types de couverts végétaux hivernaux peuvent fournir un fourrage à haute valeur nutritive pour le pâturage des ruminants. Un gain moyen quotidien de 0,8 à 1,1 kg j⁻¹ peut être atteint pour les bovins en croissance (Franzluebbbers & Stuedemann, 2007) grâce à ces fourrages qui peuvent être pâturés dès l'automne s'ils sont plantés après une récolte précoce de cultures d'été, puis légèrement pendant l'hiver et de nouveau intensément au printemps. Les périodes de transition entre les cultures commerciales et les couverts végétaux et vice-versa peuvent entraîner une minéralisation importante de l'azote et des pertes de cet azote inorganique par volatilisation ou par lessivage, mais cet effet peut être minimisé par une coordination opportune des opérations de récolte/destruction et de semis. Le stade de développement des plantes au moment du pâturage peut avoir un impact sur les performances des animaux, car la valeur nutritive de la plupart des espèces diminue avec leur maturité, une fois qu'elles sont passées au stade reproductif. Une préoccupation souvent exprimée par les agriculteurs est le compactage des sols dans ces surfaces pâturées avec des couverts végétaux hivernaux. Le piétinement du bétail peut endommager la couverture végétale et réduire les populations d'invertébrés du sol (Cluzeau *et al.*, 1992), et causer un compactage important des sols humides (Pietola *et al.*, 2005). Cependant, la plupart des études indiquent que la densité apparente du sol n'est que faiblement augmentée par le piétinement répété du bétail en présence de couverture végétale (Blanco-Canqui *et al.*, 2020). Kelly *et al.* (2021) ont également constaté que la densité apparente accrue par le pâturage bovin de couverts végétaux estivaux dans des systèmes de culture de blé (*Triticum aestivum*) sans labour dans les Grandes Plaines des États-Unis restait inférieure à un seuil critique. Dans une étude portant sur plusieurs années de prairie puis de culture en semis direct avec pâturage de couverts végétaux, l'impact d'un piétinement animal modéré a été atténué par la matière organique présente à la surface du sol (Franzluebbbers & Stuedemann, 2008).

Le pâturage des couverts végétaux a des effets mitigés sur le rendement ultérieur des cultures. Parfois, un impact négatif est rapporté, peut-être en raison de l'exposition du sol à une évaporation accrue de l'eau (Franzluebbbers & Stuedemann, 2007 ; Crowell *et al.*, 2022). Parfois, une plus grande productivité a été obtenue grâce à une meilleure fertilité avec une plus grande quantité de matière organique dans le sol (George *et al.*, 2013). Cependant, la plupart des résultats de la recherche ont révélé peu de différence dans le rendement des cultures sur le court terme, alors qu'une

diversité de services écosystémiques est simultanément augmentée (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). En pratique, il faut trouver un compromis entre la réduction du lessivage des nitrates par les couverts végétaux et l'impact négatif sur la croissance des cultures ultérieures lié à la réduction de la teneur en eau du sol et la consommation de l'azote inorganique (Meyer *et al.*, 2022).

3.3. Rotations pâturages-cultures

Les longues rotations qui comprenaient plusieurs années de prairie en rotation avec des cultures de rente (pour le grain ou la fibre) étaient une pratique courante dans de nombreuses régions agricoles tempérées avant le développement des technologies basées sur les combustibles fossiles après la Seconde Guerre mondiale (Aref & Wander, 1997). Les rotations prairie-cultures sont encore importantes pour certaines régions de production laitière, comme dans le Midwest et le Nord-Est des États-Unis et dans le Nord-Ouest de l'Europe. Les agriculteurs biologiques sont également plus enclins à utiliser des séquences de rotation prairie-culture pour reconstituer rapidement la matière organique du sol pendant une phase de prairie qui est rapidement perdue pendant la phase de culture avec travail du sol (Mayer *et al.*, 2015), ainsi que pour contrôler les adventices vivaces qui sont difficiles à éliminer avec le seul travail du sol. Certaines phases de prairie peuvent être de courte durée avec des engrais verts de 1 à 2 ans, comme dans le cas des mélanges graminées-trèfle qui sont soit fauchés pour le foin, soit cultivés simplement pour l'accumulation de biomasse avec une fixation importante de l'azote par la composante légumineuse (Blanco-Canqui *et al.*, 2017). En Europe, le mélange ray-grass italien (*Lolium multiflorum*)/trèfle violet (*Trifolium pratense*) est souvent utilisé pour la production de fourrage sur des durées courtes, tandis que le mélange ray-grass anglais/trèfle blanc (*Trifolium repens*) est utilisé sur des séquences de prairie pluriannuelles suivies de céréales de printemps ou de maïs dans les exploitations bovines et laitières. Les avantages des rotations prairie-cultures sont nombreux, tant pour les phases de production des prairies et des cultures que, plus important encore, pour l'amélioration de la matière organique du sol, de sa fertilité et de la qualité de l'environnement (Figure 3).

Une plus grande diversité d'espèces végétales avec ces longues rotations peut avoir des avantages écologiques bien au-delà des limites de la ferme, sur les populations d'oiseaux et d'animaux sauvages, la lutte biologique contre les ravageurs et l'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement des bassins versants (Duru *et al.*, 2014 ; Havet *et al.*, 2014 ; Peyraud *et al.*, 2014 ; Moraine *et al.*, 2017). Les implications en matière de production, d'environnement et d'écologie des rotations prairie-culture dans différents environnements ont été résumées ailleurs (Franzluebbbers *et al.*, 2014 ; Martin *et al.*, 2020). On ne

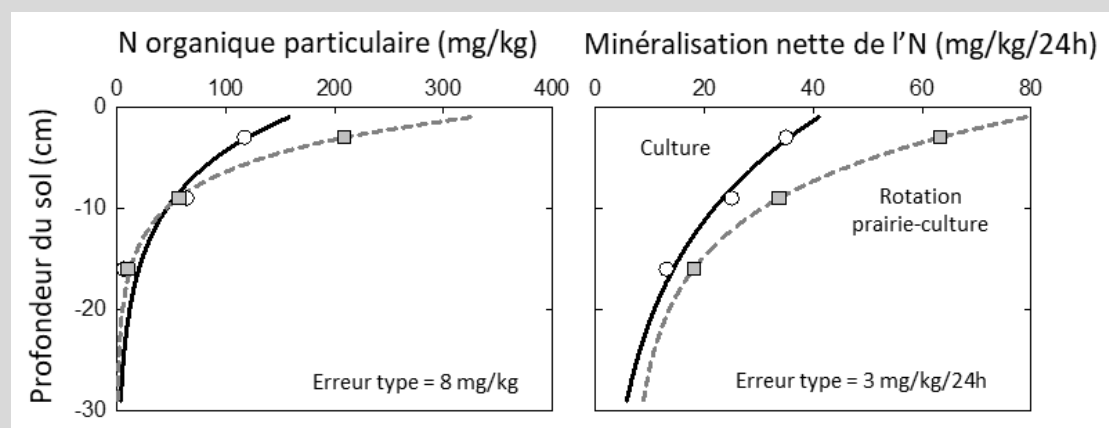


FIGURE 3 : N organique particulaire (à gauche) et minéralisation nette de l'azote (à droite) après 19 ans de cultures avec travail du sol et de rotation pâturage-culture (moyenne de deux phases d'une rotation culture + prairie pâturée de 6 ans et d'une phase de rotation culture + prairie fauchée de 3 ans) sur un sol Wickham sablo-limoneux (Hapludults typiques mixtes, semi-actifs, à limons fins) à Goldsboro, Caroline du Nord (données rapportées dans Franzluebbbers et al., 2020). L'enrichissement de la zone racinaire à partir de la distribution en profondeur de l'azote organique particulaire a été calculé comme étant de 189 kg N ha⁻¹ dans le cas des cultures et de 288 kg N ha⁻¹ dans le cas d'une rotation prairie-culture. L'enrichissement de la zone racinaire par la minéralisation nette de l'azote était de 59 kg N ha⁻¹ 24 j⁻¹ dans le cas des cultures et de 88 kg N ha⁻¹ 24 j⁻¹ dans le cas de la rotation prairie-culture. La méthode de calcul de l'enrichissement de la zone racinaire est présentée dans Franzluebbbers (2021).

Figure 3 : Particulate organic N (left panel) and net N mineralization (right panel) as affected by 19 years of continuous conventional-till cropping and pasture-crop rotations (averaged of two phases of a 6-year crop + 6-year grazed pasture rotation and single phase of a 3-year crop + 3-year hay rotation) on a Wickham loamy sand (fine-loamy, mixed, semiactive thermic Typic Hapludults) in Goldsboro, North Carolina (data reported in Franzluebbbers et al., 2020). Root-zone enrichment from depth distribution of particulate organic N was calculated as 189 kg N ha⁻¹ under conventional-till cropland and 288 kg N ha⁻¹ under pasture-crop rotation. Root-zone enrichment of net N mineralization was 59 kg N ha⁻¹ 24 d⁻¹ under conventional-till cropland and 88 kg N ha⁻¹ 24 d⁻¹ under pasture-crop rotation. Calculation method of root-zone enrichment was first presented in Franzluebbbers (2021).

saurait trop insister sur la valeur intrinsèque des rotations prairie-culture pour une approche plus durable et écologique de l'agriculture. Les énormes avantages en termes de matière organique et de santé du sol, de stabilité de l'écosystème, de qualité de l'eau, d'atténuation des gaz à effet de serre et d'amélioration de la biodiversité contribuent à une durabilité élevée. Cela était évident dans les systèmes agricoles antérieurs au développement des systèmes agricoles spécialisés, après la Seconde Guerre mondiale.

Bien qu'elles soient souvent considérées comme écologiquement importantes pour l'utilisation productive de terres impropres à la culture, les prairies semi-pérennes produisant du fourrage pour le bétail peuvent potentiellement avoir une valeur égale pour la restauration de la fertilité du sol lorsqu'elles sont mises en rotation avec des cultures sur des terres agricoles à fort potentiel agronomique (Franzluebbbers & Gastal, 2019). L'amélioration génétique des cultures et des fourrages, la lutte intégrée contre les ravageurs et les techniques de conservation du sol rendront probablement les futures rotations prairie-culture beaucoup plus productives et écologiquement résilientes que les rotations prairie-culture historiques. La flexibilité des prairies semi-pérennes dans la rotation des cultures permet d'utiliser efficacement les amendements organiques et de limiter voire d'éviter l'utilisation de pesticides.

3.4. Intégration entre exploitations

Les systèmes intégrant culture et élevage sont en déclin, et la tendance à la spécialisation en culture ou en élevage se poursuit en raison de plusieurs facteurs économiques, sociaux et politiques (Hanson & Franzluebbbers, 2008). Le retour aux systèmes intégrés culture-fourrage-élevage n'est pas toujours aisé car les investissements nécessaires (machines, clôtures, bâtiments) peuvent être coûteux, les connaissances et les compétences techniques requises peuvent avoir été perdues depuis la spécialisation, et les services supports à l'élevage ont disparu (vétérinaires, abattoirs etc.) dans certaines régions. Face à ces défis, l'intégration culture-élevage pourrait être organisée au-delà du niveau de l'exploitation (Moraine et al., 2014 ; Martin et al., 2016). Différents types de collaboration entre exploitations sont possibles en fonction du niveau de coordination spatiale, temporelle et organisationnelle. Cela peut aller de l'échange de biomasses (paille, céréales, foin, fumier) entre exploitations à la coordination en matière d'utilisation des surfaces, des circuits de pâturage et du partage des équipements et de la main-d'œuvre entre agriculteurs. Outre les avantages écologiques et agronomiques, la reconnexion culture-fourrage-élevage permet des économies de carburant, le bétail se substituant aux interventions mécaniques pour la

fauche et l'épandage du fumier (Ryschawy *et al.*, 2021). Des marchés locaux coopératifs pourraient être développés pour mutualiser les risques (Asai *et al.*, 2018). Les cultures rendues impropres à la commercialisation dans les filières classiques par les aléas climatiques pourraient faire l'objet de contrats avec les éleveurs pour leur pâturage par le bétail. Les marchés coopératifs pourraient également être un moyen de réduire la variabilité des revenus due à la volatilité des marchés. Le pâturage des couverts végétaux favorise la production conjointe de denrées alimentaires et d'aliments pour animaux sur la même unité de surface et peut être utilisé comme stratégie de commercialisation pour augmenter le revenu par unité de surface (Ryschawy *et al.*, 2021). Enfin, la reconnexion entre les cultures et l'élevage offre la possibilité d'épargner les terres inadaptées aux cultures et, par conséquent, d'utiliser les ressources plus efficacement.

Reconnecter culture, fourrage et élevage entre exploitations peut également stimuler l'échange de connaissances entre agriculteurs et leur capacité d'adaptation pour répondre aux aléas (Stark *et al.*, 2021). Les cas les plus ambitieux de reconnexion peuvent même inclure le partage de la main-d'œuvre, la délégation de tâches ou le partage de tâches entre agriculteurs (par exemple, pour les chantiers d'ensilage), ainsi que le partage d'équipements pour augmenter la productivité (Andersson *et al.*, 2005). Cela pourrait contribuer à réduire les problèmes de charge de travail en période de pointe dans certaines exploitations. De multiples contraintes socio-techniques demeurent pour développer de tels systèmes plus intégrés, comme le manque de connaissance de leurs avantages, le manque de modèles de gouvernance, les coûts logistiques et le manque d'équipements adaptés (Asai *et al.*, 2018). Ces contraintes augmentent les coûts de transaction liés à la collecte d'informations, la prise de décision collective et la mise en œuvre des systèmes agricoles plus collaboratifs circulaires.

3.5. Les protéines issues des prairies comme médiateur de la santé humaine

L'agroécologie repose sur les rythmes naturels des processus anaboliques et cataboliques de l'échelle de la parcelle à celle de la région. Comprendre ces rythmes et cycles permet de créer un système de production plus durable, bénéfique pour les humains, les plantes et les animaux, ainsi que pour la planète. Les besoins alimentaires de l'homme peuvent être considérés de manière similaire, en mettant l'accent sur un équilibre entre les aliments d'origine végétale et animale afin d'obtenir les apports complets d'énergie, de nutriments et de stimulants métaboliques nécessaires sur une base quotidienne ou hebdomadaire. Les systèmes de production animale basés sur les fourrages offrent des services écosystémiques, mais ils produisent également des disservices. Par exemple, le méthane produit par le bétail ruminant contribue de manière significative aux

émissions de gaz à effet de serre, mais l'ampleur de cet effet dépend de la taille du troupeau qui détermine la consommation d'aliments, mais aussi de la qualité des aliments (Hristov *et al.*, 2013). Une taille de troupeau excessive peut conduire à la dégradation des surfaces fourragères et à la nécessité d'importer de grandes quantités d'aliments pour le bétail, et indirectement les nutriments, l'énergie et la main-d'œuvre nécessaires pour produire ces aliments et tous les impacts environnementaux associés. Un chargement excessif et l'importation d'aliments pour le bétail à grande échelle sont des signaux de l'absence d'équilibre écologique. L'alimentation humaine connaît une situation similaire avec des régimes alimentaires polarisés à l'extrême, allant (a) d'une alimentation exclusivement végétale, sans les avantages des composants clés d'origine animale, tels que les vitamines B, à (b) une alimentation dominée par les produits animaux, les céréales très transformées et l'élimination des fibres et des phytonutriments. Les régimes équilibrés avec une consommation modérée d'aliments d'origine animale sont probablement les plus durables.

Un accès juste et équitable à l'alimentation dans le monde devrait être un objectif pour la société dans son ensemble (Bratspies, 2014). Tout comme la malnutrition et la famine doivent être à l'ordre du jour des discussions à l'échelle mondiale, la consommation excessive et le gaspillage doivent être reconnus et traités (Gillespie & van den Bold, 2017). Les protéines animales sont au cœur de ces deux questions, et interconnectées avec les questions de justice sociale et environnementale. Les fourrages devraient continuer à être une composante essentielle des systèmes agricoles et alimentaires durables. Ces systèmes agroécologiques varieront en fonction des conditions environnementales et sociales locales, aussi nous devons explorer l'espace des possibles et leurs limites à l'aide d'un programme de recherche solide.

4. Conclusion

Les systèmes intégrés culture-fourrage-élevage continuent de susciter l'intérêt de la communauté scientifique, car nous savons que les synergies entre ces composantes sont nécessaires pour développer des systèmes agricoles durables. Il faut travailler sur le terrain et dans les laboratoires pour mettre au point des systèmes qui soient rentables et respectueux de l'environnement. Développer la résilience d'une exploitation agricole ou d'une région est un défi pour lequel la simplification et l'homogénéisation ne peuvent pas être notre destin ! Il est possible de prendre des mesures relativement simples pour commencer à rétablir les liens entre culture, fourrage et élevage, comme l'épandage systématique de quantités modérées de fumier sur les terres cultivées, le recours aux couverts végétaux et leur pâturage, le développement d'une diversité de rotations écologiquement pertinentes avec des fourrages semi-pérennes et des cultures de

rente, et à l'échelle locale, les échanges d'aliments pour le bétail contre du fumier. Ces mesures peuvent contribuer à développer la résilience au changement climatique, à atténuer les émissions de gaz à effet de serre, à renforcer la santé des sols, à éviter la dégradation de l'environnement et à favoriser la biodiversité. Les fourrages annuels et semi-pérennes sont des éléments nécessaires à un système agricole et alimentaire circulaire, sain et durable. L'élevage au pâturage contribue au bien-être des animaux et à l'image positive des herbivores dans les systèmes agricoles. Les prairies bien gérées favorisent l'enrichissement de la biodiversité, rendent les paysages plus fonctionnels sur le plan hydrologique, aident à réguler les cycles biogéochimiques, réduisent les besoins en pesticides, stockent des quantités importantes de carbone dans le sol et résistent à l'érosion. Une diversité d'approches pour l'intégration des fourrages dans les systèmes de culture modernes sera nécessaire pour s'adapter au large éventail de conditions environnementales, écologiques et sociales dans différentes parties du monde.

Article accepté pour publication le 04 avril 2023

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agreste, (2021). « GRAPH'AGRI 2021 - L'agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires ». Available at https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2021Integral/GraFra2021_integral.pdf. Accessed 24 August 2022.
- Agreste, (2022). « Chiffres et analyses ». Accessed at: <https://agreste.agriculture.gouv.fr/>
- Allen R.C., (1988). « The growth of labor productivity in early modern English agriculture ». *Explorations in Economic History*, 25, 117-146.
- Ampt E.A., van Ruijven J., Raaijmakers J.M., Termorshuizen A.J., & Mommer L., (2019). « Linking ecology and plant pathology to unravel the importance of soil-borne fungal pathogens in species-rich grasslands ». *European Journal of Plant Pathology*, 154, 141-156.
- Andersson H., Larsén K., Lagerkvist C.-J., Andersson C., Blad F., Samuelsson J., & Skargren P., (2005). « Farm cooperation to improve sustainability ». *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 34, 383-387.
- Anglade J., Billen G., & Garnier J., (2015). « Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: Incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe ». *Ecosphere*, 6, 1-24.
- Anomaly J., (2015). « What's wrong with factory farming? ». *Public Health Ethics*, 8, 246-254.
- Aref S., & Wander M.M., (1997). « Long-term trends of corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments on the Morrow Plots ». *Advances in Agronomy*, 62, 153-197.
- Asai M., Moraine M., Ryschawy J., de Wit J., Hoshida A.K., & Martin G., (2018). « Critical factors for crop-livestock integration beyond the farm level: A cross-analysis of worldwide case studies ». *Land Use Policy*, 73, 184-194.
- Bastos-Martins L., Rejesus R.M., Reberg-Horton C., & Myers R.L., (2021). « Understanding the market for cover crop seeds in the United States: Background and potential policy directions ». *Journal of Soil and Water Conservation*, 76, 83A-88A.
- Bell L.W., Moore A.D., & Kirkegaard J.A., (2014). « Evolution in crop-livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia ». *European Journal of Agronomy*, 57, 10-20.
- Billen G., Beusen A., Bouwman L., & Garnier J., (2010). « Anthropogenic nitrogen autotrophy and heterotrophy of the world's watersheds: Past, present, and future trends ». *Global Biogeochemical Cycles*, 24, <https://doi.org/10.1029/2009GB003702>.
- Blanco-Canqui H., Drewnoski M.E., MacDonald J.C., Redfearn D.D., Parsons J., Lesoing G.W., & Williams T., (2020). « Does cover crop grazing damage soils and reduce crop yields? ». *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 3, e20102.
- Blanco-Canqui H., Francis C.A., & Galusha T.D., (2017). « Does organic farming accumulate carbon in deeper soil profiles in the long term? ». *Geoderma*, 288, 213-221.
- Blanco-Canqui H., Shaver T.M., Lindquist J.L., Shapiro C.A., Elmore R.W., Francis C.A., & Hergert G.W., (2015). « Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils ». *Agronomy Journal*, 107, 2449-2474.
- Bratspies R.M., (2014). « Food, technology and hunger ». *Law, Culture and the Humanities*, 10, 212-224.
- Calhoun W.R., & Cecala K.K., (2021). « At the expense of the environment: Economic and regulatory factors impacting the location and management of concentrated animal feeding operations (CAFOs) in North Carolina ». *Case Studies in the Environment*, 5, 1428433.
- Capper J.L., Cady R.A., & Bauman D.E., (2009). « The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007 ». *Journal of Animal Science*, 87, 2160-2167.
- Cluzeau D., Binet F., Vertes F., Simon J.C., Riviere J.M., & Trehen P., (1992). « Effects of intensive cattle trampling on soil-plant-earthworms system in two grassland types ». *Soil Biology and Biochemistry*, 24, 1661-1665.
- Cosentino S.L., Gresta F., & Testa G., (2014). « Forage chain arrangement for sustainable livestock systems in a Mediterranean area ». *Grass and Forage Science*, 69, 625-634.
- Crowell H., Gamble A.V., Feng Y., Balkcom K., & Yang A., (2022). « Impacts of winter grazing on soil health in southeastern cropping systems ». *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 5, e20240.
- Davis A.S., Hill J.D., Chase C.A., Johanns A.M., & Liebman M., (2012). « Increasing cropping system diversity balances productivity, profitability and environmental health ». *PLoS ONE*, 1, e47149.
- Davis S.K., Fisher R.J., Skinner S.L., Shaffer T.L., & Brigham R.M., (2013). « Songbird abundance in native and planted grassland varies with type and amount of grassland in the surrounding landscape ». *The Journal of Wildlife Management*, 77, 908-919.
- Dong W., Yu L., Gao-Lin W., Lu-Ming D., Zheng Y., & Hong-Min H., (2015). « Effect of rest-grazing management on soil water and carbon storage in an arid grassland (China) ». *Journal of Hydrology*, 527, 754-760.
- Droogers P., Fermont A., & Bouma J., (1996). « Effects of ecological soil management on workability and trafficability of a loamy soil in the Netherlands ». *Geoderma*, 73, 131-145.
- Dunn M., Ulrich-Schad J.D., Prokopy L.S., Myers R.L., Watts C.R., & Scanlon K., (2016). « Perceptions and use of cover crops among early adopters: Findings from a national survey ». *Journal of Soil and Water Conservation*, 71, 29-40.
- Duru M., Jouany C., Le Roux X., Navas M.L., & Cruz P., (2014). « From a conceptual framework to an operational approach for managing grassland functional diversity to obtain targeted ecosystem services: Case studies from French mountains ». *Renewable Agriculture and Food Systems*, 29, 239-254.
- Farmaha B.S., Sekaran U., & Franzluebbers A.J., (2022). « Cover cropping and conservation tillage improve soil health in the southeastern United States ». *Agronomy Journal*, 114, 296-316.
- Ferrière A., (2021). « Agriculture in Roman Gaul ». In D. Hollander & T. Howe (Eds.). *A companion to ancient agriculture*, First Edition. John Wiley & Sons, Inc. pp. 447-477.
- Francis C., Lieblein G., Gliessman S., Breland T.A., Creamer N., Harwood R., Salomonsson L., Helenius J., Rickerl D., Slavador R., Wiedenhoef M., Simmons S., Allen P., Altieri M., Flora C., & Poincelot R., (2003). « Agroecology: The ecology of food systems ». *Journal of Sustainable Agriculture*, 22, 99-118.
- Francis C., Van Wart J., & Johnson B., (2014). « How to regenerate rural community and ecoservices: Reversing the tragedy of the commons ». *Agronomy Journal*, 106, 95-99.

- Franzluebbers A.J., (2007). « Integrated crop-livestock systems in the southeastern USA ». *Agronomy Journal*, 99, 361-372.
- Franzluebbers A.J., (2021). « Soil organic carbon sequestration calculated from depth distribution ». *Soil Science Society of America Journal*, 85, 158-171.
- Franzluebbers A.J., & Gastal F., (2019). « Building agricultural resilience with conservation pasture-crop rotations ». In G. Lemaire, P.C.F. Carvalho, S. Kronberg, & S. Recous (Eds.). *Agroecosystem diversity: Reconciling contemporary agriculture and environmental quality*. Elsevier, Academic Press. pp. 109-121.
- Franzluebbers A., Hunt D., Telford G., Bittman S., & Ketterings Q., (2021). « Integrated crop-livestock systems: Lessons from New York, British Columbia, and the south-eastern United States ». *Frontiers in Agricultural Science and Engineering*, 8, 81-96.
- Franzluebbers A.J., Reberg-Horton S.C., & Creamer N.G., (2020). « Soil carbon and nitrogen fractions after 19 years of farming systems research in the Coastal Plain of North Carolina ». *Soil Science Society of America Journal*, 84, 856-876.
- Franzluebbers A.J., Sawchik J., & Taboada M.A., (2014). « Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190, 18-26.
- Franzluebbers A., Steiner J., Karlen D., Griffin T., Singer J., & Tanaka D., (2011). « Rainfed farming systems in the USA ». In P. Tow, I. Cooper, I. Partridge, & C. Birch (Eds.) *Rainfed farming systems*, Springer, Dordrecht, Netherlands. pp. 511-560.
- Franzluebbers A.J., & Stuedemann J.A., (2007). « Crop and cattle responses to tillage systems for integrated crop–livestock production in the Southern Piedmont, USA ». *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22, 163-180.
- Franzluebbers A.J., & Stuedemann J.A., (2008). « Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA ». *Soil and Tillage Research*, 100, 141-153.
- Franzluebbers A.J., Wendroth O., Creamer N.G., & Feng G.G., (2020). « Focusing the future of farming on agroecology ». *Agricultural & Environmental Letters*, 5, e20034.
- Franzluebbers A.J., Wright S.F., & Stuedemann J.A., (2000). « Soil aggregation and glomalin under pastures in the Southern Piedmont USA ». *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1018-1026.
- Fullen M.A., (1998). « Effects of grass ley set-aside on runoff, erosion and organic matter levels in sandy soils in East Shropshire, UK ». *Soil and Tillage Research*, 46, 41-49.
- Fullen M.A., Booth C.A., & Brandsma R.T., (2006). « Long-term effects of grass ley set-aside on erosion rates and soil organic matter on sandy soils in east Shropshire, UK ». *Soil and Tillage Research*, 89, 122-128.
- Galloway J.N., Burke M., Bradford G.E., Naylor R., Falcon W., Chapagain A.K., Gaskell J.C., McCullough E., Mooney H.A., Oleson K.L.L., Steinfeld H., Wassenaar T., & Smil V., (2007). « International trade in meat: The tip of the pork chop ». *Ambio*, 36, 622- 629.
- Garnier J., Anglade J., Benoit M., Billen G., Puech T., Ramarson A., Passy P., Silvestre M., Lassaletta L., Trommenschlager J.-M., Schott C., & Tallec G., (2016). « Reconnecting crop and cattle farming to reduce nitrogen losses to river water of an intensive agricultural catchment (Seine basin, France): past, present and future ». *Environmental Science & Policy*, 63, 76-90.
- George S., Wright D.L., & Marois J.J., (2013). « Impact of grazing on soil properties and cotton yield in an integrated crop–livestock system ». *Soil and Tillage Research*, 132, 47-55.
- Gillespie S., & van den Bold M., (2017). « Agriculture, food systems, and nutrition: Meeting the challenge ». *Global Challenges*, 1, 1600002.
- Glatzel S., & Stahr K., (2001). « Methane and nitrous oxide exchange in differently fertilised grassland in southern Germany ». *Plant and Soil*, 231, 21-35.
- Gyssels G., Poesen J., Bochet E., & Li Y., (2005). « Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 29, 189-217.
- Hannachi M., & Tichit M., (2016). « Does biotechnological innovation require organizational innovation? Learning from the cattle breeding industry in France ». *Animal Frontiers*, 6, 80-85.
- Hanson J.D., & Franzluebbers A., (2008). « Principles of integrated agricultural systems ». *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23, 263-264.
- Harmin C., (2015). « Flood vulnerability of hog farms in eastern North Carolina: An inconvenient poop ». *MS thesis*, East Carolina University, <https://thescholarship.ecu.edu/handle/10342/5143>.
- Havet A., Coquil X., Fiorelli J.L., Gibon A., Martel G., Roche B., Ryschawy J., Schaller N., & Dedieu B., (2014). « Review of livestock farmer adaptations to increase forages in crop rotations in western France ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 120-127.
- Hendrickx F., Maelfait J.-P., van Wingerden W., Schweiger O., Speelmans M., Aviron S., Augenstein I., Billeter R., Bailey D., Bukacek R., Burel F., Diekoetter T., Dirksen J., Herzog F., Liira J., Roubalova M., Vandomme V., & Bugter R., (2007). « How landscape structure, land-use intensity and habitat diversity affect components of total arthropod diversity in agricultural landscapes ». *Journal of Applied Ecology*, 44, 340-351.
- Hristov A.N., Oh J., Firkins J.L., Dijkstra J., Kebreab E., Waghorn G., Makkar H.P.S., Adesogan A.T., Wang W., Lee C., Gerber P.J., Henderson B., & Tricarico J.M., (2013). « Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations : I. A review of enteric methane mitigation options ». *Journal of Animal Science*, 91, 5045-5069.
- INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques), (2020). « Tables of the French economy ». Accessed at: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4277860?sommaire=4318291#consulter>.
- Jackson R.D., (2022). « Grazed perennial grasslands can match current beef production while contributing to climate mitigation and adaptation ». *Agricultural & Environmental Letters*, 7, e20059.
- Jackson R.D., Paine L.K., Gratton C., Barham B.L., Sanford G.R., Booth E., . . . Kriegl T., (2020). « A vision for agriculture ». Retrieved from <https://aeon.co/essays/our-grasslands-have-been-poisoned-by-intensive-farming>.
- Johnston A.E., Poulton P.R., Coleman K., Macdonald A.J., & White R.P., (2017). « Changes in soil organic matter over 70 years in continuous arable and ley–arable rotations on a sandy loam soil in England ». *European Journal of Soil Science*, 68, 305-316.
- Jones J., Verma B., Basso B., Mohtar R., & Matlock M., (2021). « Transforming food and agriculture to circular systems: A perspective for 2050 ». *Resource*, March/April 2021, p. 7-9.
- Kelly C., Schipanski M.E., Tucker A., Trujillo W., Holman J.D., Obour A.K., Johnson S.K., Brummer J.E., Haag L., & Fonte S.J., (2021). « Dryland cover crop soil health benefits are maintained with grazing in the U.S. High and Central Plains ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 313, 107358.
- Khambani L.S., Hassen A.I., & Regnier T., (2019). « Rhizospheric bacteria from pristine grassland have beneficial traits for plant growth promotion in maize (*Zea mays* L.) ». *Cogent Biology*, 5, 1.
- Kooistra L.I., (2008). « Vegetation history and agriculture in the cover-sand area west of Breda (province of Noord-Brabant, The Netherlands) ». *Vegetation History and Archaeobotany*, 17, 113-125.
- Kremer R.J., & Hezel L.F., (2013). « Soil quality improvement under an ecologically based farming system in northwest Missouri ». *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28, 245-254.
- Lal R., Reicosky D.C., & Hanson J.D., (2007). « Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming ». *Soil and Tillage Research*, 93, 1-12.
- Lampkin N., Schwarz G., & Bellon S., (2022). « Policies for agroecology in Europe, building on experiences in France, Germany and the United Kingdom ». *Journal of Sustainable and Organic Agricultural Systems, Landbauforschung*, 70, 103-112.
- Lebacqz T., Baret P., & Stilmant D., (2015). « Role of input self-sufficiency in the economic and environmental sustainability of specialised dairy farms ». *Animal*, 9, 544-552.
- Lechenet M., Makowski D., Py G., & Munier-Jolain N., (2016). « Profiling farming management strategies with contrasting pesticide use in France ». *Agricultural Systems*, 149, 40-53.

- Lee M.A., (2018). « A global comparison of the nutritive values of forage plants grown in contrasting environments ». *Journal of Plant Research*, 131, 641-654.
- Lemaire G., Franzluebbers A., Carvalho P.C.F., & Dedieu B., (2014). « Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190, 4-8.
- Leytem A.B., Bjorneberg D.L., Rotz C.A., Moraes L.E., Kebreab E., & Dungan R.S., (2018). « Ammonia emissions from dairy lagoons in the western U.S ». *Transactions of the ASABE*, 61, 1001-1015.
- Liu Y., Ding C., Xua X., Wang K., Li Y., Pan H., Zhang Q., Dumont M.G., Di H., Xu J., & Li Y., (2022). « Atmospheric methane oxidation is affected by grassland type and grazing and negatively correlated to total soil respiration in arid and semiarid grasslands in Inner Mongolia ». *Soil Biology and Biochemistry*, 173, 108787.
- López-García D., Cuéllar-Padilla M., de Azevedo Oliva A., Laranjeira N.P., Méndez V.E., Peredo y Parada S., Barbosa C.A., Barrera Salas C., Caswell M., Cohen R., Corro-Humanes A., García-García V., Glessman S.R., Pomar-León A., Sastre-Morató A., & Tendo-Acín G., (2021). « Building agroecology with people. Challenges of participatory methods to deepen on the agroecological transition in different contexts ». *Journal of Rural Studies*, 83, 257-267.
- Martin G., Moraine M., Ryschawy J., Magne M.-A., Asai M., Sarthou J.-P., Duru M., & Therond O., (2016). « Crop–livestock integration beyond the farm level: A review ». *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 53.
- Martin G., Durand J.L., Duru M., Gastal F., Julier B., Litrico I., Louarn G., Médiène S., Moreau D., Valentin-Morison M., Novak S., Parnaudeau V., Paschalidou F., Vertès F., Voisin A.S., Cellier P., & Jeuffroy M.H., (2020). « Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review ». *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 17.
- Mayer J., Gunst L., Mäder P., Samson M.-F., Carcea M., Narducci V., Thomsen I.K., & Dubois D., (2015). « Productivity, quality and sustainability of winter wheat under long-term conventional and organic management in Switzerland ». *European Journal of Agronomy*, 65, 27-39.
- Meiss H., Médiène S., Waldhardt R., Caneill J. & Munier-Jolain N., (2010). « Contrasting weed species composition in perennial alfalfas and six annual crops: implications for integrated weed management ». *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 657-666.
- Mellor D.J., (2015). « Positive animal welfare states and reference standards for welfare assessment ». *New Zealand Veterinary Journal*, 63, 17-23.
- Meyer N., Bergez J.-E., Justes E., & Constantin J., (2022). « Influence of cover crop on water and nitrogen balances and cash crop yield in a temperate climate: A modelling approach using the STICS soil-crop model ». *European Journal of Agronomy*, 132, 126416.
- Millennium Ecosystem Assessment, (2005). « Ecosystems and human well-being: Synthesis ». Island Press, Washington, DC. Available at: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>.
- Moraes A., Carvalho P.C.F., Anghinoni I., Lustosa S.B.C., Andrade-Costa S.E.V.G., & Kunrath T.R., (2014). « Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics ». *European Journal of Agronomy*, 57, 4-9.
- Moraine M., Duru M., Nicholas P., Leterme P., & Therond O., (2014). « Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe ». *Animal*, 8, 1204-1217.
- Moraine M., Duru M., & Therond O., (2017). « A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels ». *Renewable Agriculture and Food Systems*, 32, 43-56.
- Nicholls C.I., & Altieri M.A., (2018). « Pathways for the amplification of agroecology ». *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42, 1170-1193.
- NRC (National Research Council), (2010). « Toward sustainable agricultural systems in the 21st century ». Committee on Twenty-First Century Systems Agriculture, Board on Agriculture and Natural Resources, National Academies Press, Washington, DC.
- Obriot F., Stauffer M., Goubard Y., Cheviron N., Peres G., Eden M., Revallier A., Vieuble-Gonod L., & Houot S., (2016). « Multi-criteria indices to evaluate the effects of repeated organic amendment applications on soil and crop quality ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 232, 165-178.
- Peyraud J.-L., Taboada M., & Delaby L., (2014). « Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: A review ». *European Journal of Agronomy*, 57, 31-42.
- Pietola L., Horn R., & Yli-Halla M., (2005). « Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil ». *Soil and Tillage Research*, 82, 99-108.
- Poelplau C., & Don A., (2015). « Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 200, 33-41.
- Porazinska D.L., Bardgett R.D., Blaauw M.B., Hunt H.W., Parsons A.N., Seastedt T.R., & Wall D.H., (2003). « Relationships at the aboveground-belowground interface: Plants, soil biota, and soil processes ». *Ecological Monographs*, 73, 377-395.
- Provenza F.D., Villalba J.J., Dziba L.E., Atwood S.B., & Banner R.E., (2003). « Linking herbivore experience, varied diets, and plant biochemical diversity ». *Small Ruminant Research*, 49, 257-274.
- Pyke C.R., & Marty J., (2005). « Cattle grazing mediates climate change impacts on ephemeral wetlands ». *Conservation Biology*, 19, 1619-1625.
- Rasmussen J., Sørensen K., Pirhofer-Walzl K., & Eriksen J., (2012). « N₂-fixation and residual N effect of four legume species and four companion grass species ». *European Journal of Agronomy*, 36, 66-74.
- Rasmussen W.D., (1962). « The impact of technological change on American agriculture, 1862-1962 ». *The Journal of Economic History*, 22, 578-591.
- Ribeiro R.H., Ibarra M.A., Besen M.R., Bayer C., & Piva J.T., (2020). « Managing grazing intensity to reduce the global warming potential in integrated crop-livestock systems under no-till agriculture ». *European Journal of Soil Science*, 71, 1120-1131.
- Ryschawy J., Martin G., Moraine M., Duru M., & Therond O., (2017). « Designing crop–livestock integration at different levels: Toward new agroecological models? ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108, 5-20.
- Ryschawy J., Tiffany S., Gaudin A., Niles M.T., & Garrett R., (2021). « Moving niche agroecological initiatives to the mainstream: A case-study of sheep-vineyard integration in California ». *Land Use Policy*, 109, 105680.
- Ruas M.P., (2005). « Aspects of early medieval farming from sites in Mediterranean France ». *Vegetation History and Archaeobotany*, 14, 400-415.
- Russelle M.P., Entz M.H., & Franzluebbers A.J., (2007). « Reconsidering integrated crop-livestock systems in North America ». *Agronomy Journal*, 99, 325-334.
- Santé Publique France, (2018). « Le suicide des agriculteurs ». Available at: <https://www.santepubliquefrance.fr/les-actualites/2018/le-suicide-des-agriculteurs>
- Schieltz J.M., & Rubenstein D.I., (2016). « Evidence based review: Positive versus negative effects of livestock grazing on wildlife. What do we really know? ». *Environmental Research Letters*, 11, 113003.
- Schipanski M.E., Barbercheck M., Douglas M.R., Finney D.M., Haider K., Kaye J.P., Kemanian A.R., Mortensen D.A., Ry M.R., Tooker J., & White C., (2014). « A framework for evaluating ecosystem services by cover crops in agroecosystems ». *Agricultural Systems*, 125, 12-22.
- Schultze-Kraft R., Rao I.M., Peters M., Clements R.J., Bai C., & Liu G., (2018). « Tropical forage legumes for environmental benefits: An overview ». *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 6, 1-14.
- Seaton F.M., Griffiths R.L., Goodall T., Lebron I., Norton L.R., (2022). « Pasture age impacts soil fungal composition while bacteria respond to soil chemistry ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330, 107900.
- Shackelford G., Steward P.R., Benton T.G., Kunin W.E., Potts S.G., Biesmeijer J.C., & Sait S.M., (2013). « Comparison of pollinators and natural enemies: a meta-analysis of landscape and local effects on abundance and richness in crops ». *Biological Reviews*, 88, 1002-1021.

- Smith T.J., (2019). « Corn, cows, and climate change: How federal agriculture subsidies enable factory farming and exacerbate U.S. greenhouse gas emissions ». *Washington Journal of Environmental Law & Policy*, 9, <https://digitalcommons.law.uw.edu/wjelp/vol9/iss1/3>.
- Smith M.M., Bentrup G., Kellerman T., MacFarland K., Straight R., Ameyaw L., & Stein S., (2022). « Silvopasture in the USA: A systematic review of natural resource professional and producer-reported benefits, challenges, and management activities ». *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 326, 107818.
- Sollenberger L.E., Kohmann M.M., Dubeux J.C.B., & Silveira M.L., (2019). « Grassland management affects delivery of regulating and supporting ecosystem services ». *Crop Science*, 59, 441-459.
- Stark F., Ryschawy J., Grillot M., Mettauer R., Martin G., Cassagnes A., Bertin Y., & Moraine M., (2021). « Biotechnical and sociotechnical conditions required to engage an agroecological transition: A case-study of organic sheep crop integration in South-western France ». *Landscape 2021 Congress, Diversity for Sustainable and Resilient Agriculture*, Online, 20-22 September 2021.
- Steiner J.L., & Franzluebbers A.J., (2009). « Farming with grass – for people, for profit, for production, for protection ». *Journal of Soil and Water Conservation*, 64, 75A-80A.
- Sulc R.M., & Franzluebbers A.J., (2014). « Exploring integrated crop-livestock systems in different ecoregions of the United States ». *European Journal of Agronomy*, 57, 21-30.
- Swinnen J., Olper A., & Vandeveld S., (2021). « From unfair prices to unfair trading practices: Political economy, value chains and 21st century agri-food policy ». *Agricultural Economics*, 52, 771-788.
- Thangarajan R., Bolan N.S., Tian G., Naidu R., & Kunhikrishnan A., (2013). « Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil ». *Science of the Total Environment*, 465, 72-96.
- Triberti L., Nastri A., & Baldoni G., (2016). « Long-term effects of crop rotation, manure and mineral fertilisation on carbon sequestration and soil fertility ». *European Journal of Agronomy*, 74, 47-55.
- USDA-NASS (National Agricultural Statistics Service), (2020). « Census of Agriculture ». United States Department of Agriculture, Washington, DC. Accessed at: <https://www.nass.usda.gov/AgCensus/>
- Wiema R.A., Carpenter-Boggs L.A., Crowder D.W., Murphy K.M., & Reganold J.P., (2020). « Agronomic and economic performance of organic forage, quinoa, and grain crop rotations in the Palouse region of the Pacific Northwest, USA ». *Agricultural Systems*, 177, 102709.
- Wood S.A., & Bowman M., (2021). « Large-scale farmer-led experiment demonstrates positive impact of cover crops on multiple soil health indicators ». *Nature Food*, 2, 97-103.
- Wu S., Wu P., Feng H., & Merkley G.P., (2011). « Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots ». *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, 5, 76-83.
- Wuest S.B., & Gollany H.T., (2013). « Soil organic carbon and nitrogen after application of nine organic amendments ». *Soil Science Society of America Journal*, 77, 237-245.