



Association Francophone pour
les Prairies et les Fourrages

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



Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

AFPF – Maison Nationale des Eleveurs –
149 rue de Bercy – 75595 Paris Cedex 12

Tel. : +33.(0)7.69.81.16.62 – Mail : contact@afpf-asso.fr

Placer les prairies permanentes au cœur d'une transition agroécologique européenne : résultats et enjeux découlant du scénario "Ten Years For Agroecology" (TYFA)

X. Poux^{1,2}, P.-M. Aubert²

RESUME

Si l'importance des prairies permanentes (PP) pour la conservation des habitats à haute valeur naturelle est souvent reconnue, leur rôle dans la plupart des principaux scénarios de systèmes alimentaires durables publiés ces dernières années est moins explicite. Dans le meilleur des cas, leur statut dans les scénarios et les agendas politiques est leur conservation de principe ; dans le pire des cas, elles sont simplement remplacées par des terres boisées ou des terres cultivées, considérées comme une meilleure option lorsque l'accent est mis uniquement sur les émissions de GES. Dans cet article, nous défendons l'idée que plusieurs interprétations erronées des impacts positifs et négatifs des ruminants, qui sont les utilisateurs "naturels" des PP, expliquent pourquoi ces derniers sont mal pris en compte par la plupart des scénarios. Sur la base des résultats d'un scénario agroécologique pour l'Europe - TYFA (Ten Years For Agroecology) - dans lequel les prairies permanentes extensives et les ruminants jouent ensemble un rôle important dans la conservation de la biodiversité, le cycle de l'azote et l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, nous envisageons un programme de recherche qui permettrait de mieux informer sur le rôle spécifique de la PP et des ruminants dans la fourniture de services écosystémiques - et en particulier ceux qui dépendent de la gestion de l'azote.

SUMMARY

Putting permanent grassland at the heart of a European agroecological transition: findings and questions arising from the "Ten Years For Agroecology" (TYFA) scenario

While the importance of permanent grasslands (PG) for the conservation of high nature value habitats is often acknowledged, their role in most of the main sustainable food system scenarios published in the last few years is less explicit. In the best case, the place of permanent grassland in scenarios and policy agendas is their conservation; in the worst one, they are simply replaced by a forested land or cropland, considered as a better option when the focus is on GHG emissions only. In this paper, we defend the idea that several misinterpretations of the positive and negative impacts of ruminants, the "natural" users of PG, explain why ruminants are poorly addressed by most scenarios. Based on the findings of an agroecological scenario for Europe – TYFA, standing for Ten Years For Agroecology — in which extensive permanent grassland and ruminants together play a prominent role for biodiversity conservation, nitrogen cycling and climate change mitigation and adaptation, we call for a research agenda that would better inform the specific role of PG in the provision of ecosystem services – and in particular those that depend on nitrogen management.

Le manque de durabilité du système alimentaire européen sur la plupart des dimensions ne fait plus débat (AEE & OFEV, 2020), comme le reconnaissent désormais les objectifs fixés dans la stratégie Farm2Fork, composante du Green Deal européen (CE, 2020). Plusieurs scénarios ont été publiés ces dernières années à différentes échelles (du niveau national au niveau de l'UE, en passant par des approches régionales), proposant des moyens de ramener le système alimentaire de l'UE dans les limites durables à l'échelle planétaires (Solagro *et al.*, 2016 ; CE,

2018 ; ECF, 2018 ; Karlsson *et al.*, 2018 ; Springmann *et al.*, 2018 ; Lóránt & Allen, 2019 ; Willett *et al.*, 2019 ; Billen *et al.*, 2021 ; Searchinger *et al.*, 2021 ; van Selm *et al.*, 2022). Dans la plupart de ces scénarios (par exemple, ECF, 2018 ; Springmann *et al.*, 2018 ; Lóránt & Allen, 2019 ; Searchinger *et al.*, 2021), l'accent est mis sur l'atténuation du changement climatique, bien que la biodiversité puisse également être abordée dans d'autres scénarios. Dans une revue récemment publiée, incluant la plupart de ces scénarios, Duru *et al.* (2021) montrent que pour atteindre leurs objectifs climatiques,

AUTEURS

1 : ASca, 8 rue Legouvé, 75010 Paris, France

2 : IDDRI, 41 rue du Four, 75006 Paris, France

MOTS-CLES : prairie permanente, scénario, agroécologie, biodiversité, changement climatique, élevage, azote

KEY-WORDS : permanent grassland, scenario, agroecology, biodiversity, climate change, livestock, nitrogen

REFERENCE DE L'ARTICLE : X. Poux, P.- M. Aubert, (2023). « Placer les prairies permanentes au cœur d'une transition agroécologique européenne : résultats et enjeux découlant du scénario "Ten Years For Agroecology" (TYFA) ». *Fourrages* 253, 5-19

la grande majorité des scénarios s'appuient sur (a) une réduction du bétail - y compris des ruminants ; (b) des augmentations de rendement ; (c) d'importants changements d'utilisation des terres par le boisement des terres libérées, grâce à la fois aux augmentations de rendement et à la réduction de l'utilisation des prairies permanentes par les ruminants.

En tant que telles, les prairies permanentes (PP) - définies ici comme une végétation herbacée et non herbacée (ligneuse) utilisée pour le pâturage et/ou la fauche, qui n'ont pas été labourées au cours des cinq dernières années ou plus - sont généralement considérées comme des terres à prendre pour le reboisement. Si les services écosystémiques qu'elles rendent peuvent être reconnus (par exemple dans Solagro *et al.*, 2016 ; Karlsson *et al.*, 2018) - à la suite d'une vaste littérature (par exemple Ryschawy *et al.*, 2017 ; Simoncini *et al.*, 2019 ; Schils *et al.*, 2022) - ils ne sont pas explicitement traités dans les modèles qui sous-tendent les scénarios (comme cela est également mentionné dans Bengtsson *et al.*, 2019). De plus, si les PP peuvent être positivement considérées, leurs "gestionnaires naturels" - à savoir les ruminants - sont généralement considérés comme des convertisseurs inefficaces d'aliments par rapport aux volailles et aux porcs (Herrero *et al.*, 2013), et responsables d'importantes émissions de méthane (Steinfeld *et al.*, 2006). Un rapport récent issu d'un atelier conjoint entre l'IPBES et le GIEC (Pörtner *et al.*, 2021) présente la situation de manière similaire : la PP doit être conservée et non convertie pour produire de la bioénergie, mais la consommation de viande bovine et de produits laitiers doit être réduite au minimum. La façon dont les PP seront ensuite gérées pour fournir une variété de services écosystémiques (relatifs par exemple à la régulation des cycles de l'azote et du carbone, à la fourniture d'aliments nutritifs, à la régulation de la qualité/du cycle de l'eau, à la conservation du paysage ou à la fourniture d'habitats à un large éventail d'espèces - voir l'étude de D'Ottavio *et al.*, 2018) reste une question ouverte dans une telle perspective.

Dans ce contexte, cet article présente un scénario explicitement développé pour mieux prendre en compte le rôle des prairies permanentes et des ruminants dans la transition vers un système alimentaire européen plus durable : le scénario "Ten Years For Agroecology in Europe" (présenté sous différentes formes dans Poux & Aubert, 2018 ; Aubert *et al.*, 2019 ; Schiavo *et al.*, 2021). Le scénario repose sur le développement d'un outil de modélisation *ad-hoc* du bilan de la biomasse, dont la structure est esquissée dans la partie 2, ainsi que les hypothèses clés qui sous-tendent le scénario. La partie 3 présente les principaux impacts du scénario sur l'utilisation des terres, la production et la consommation alimentaire et les émissions de gaz à effet de serre, et donne plus de détails sur le rôle des PP et des ruminants dans ces résultats. Le scénario soulève d'importantes interrogations tant d'un point de vue scientifique que politique. Elles sont abordées dans la section de

discussion (partie 4) et couvrent la contribution des PP à la fourniture et au cycle de l'azote, le potentiel de redéploiement des PP à travers les territoires européens (contre la tendance actuelle à la spécialisation), la place des aliments à base de ruminants dans les régimes alimentaires de l'UE ; et les compromis potentiels entre la conservation de la biodiversité et la neutralité climatique. La partie 5 conclut sur les perspectives politiques et de recherche ouvertes par cet article.

1. Spécification du modèle, sources de données et hypothèses de scénario

1.1. Spécification du modèle et sources de données

Le scénario TFYA repose sur un modèle d'équilibre de la biomasse (appelé TYFAM ci-après) organisé autour de cinq compartiments entre lesquels circulent la matière et l'énergie, et qui sont connectés de manière systémique (voir figure 1) :

1. *La production végétale*, résultant d'une certaine utilisation des terres européennes (répartie entre les terres arables, les cultures permanentes, les prairies permanentes et les infrastructures agro-écologiques : haies, arbres, étangs, habitats pierreux, éléments semi-naturels linéaires) et les rendements moyens associés au niveau de l'UE. TYFAM prend en compte 36 types de cultures annuelles (sur la base d'Eurostat), de cultures permanentes (oliviers, fruits), de prairies (permanentes et temporaires) et d'autres infrastructures agro-écologiques ;
2. *La production animale*, alimentée par une fraction de la production végétale, dont une partie peut entrer en concurrence avec l'alimentation humaine (par exemple les céréales), tandis que le reste n'entre pas en concurrence (prairies et coproduits). Pour chaque type d'animaux, un ou deux systèmes d'élevages types sont considérés ;
3. *La demande alimentaire*, qui résulte des habitudes alimentaires individuelles, du coefficient de gaspillage et d'un niveau projeté de croissance démographique en Europe, et qui est couverte à la fois par la production européenne et les produits importés. La consommation alimentaire est exprimée à la fois en termes d'équivalent produit brut (pour chaque catégorie de produits), et de sa traduction en macro-nutriments (glucides, lipides, protéines, fibres et sucre) - afin de la comparer aux recommandations nutritionnelles ;
4. La demande *non alimentaire/industrielle* de biomasse (énergie et biomatériaux), qui peut à nouveau être couverte par un mélange de production européenne et d'importations ;
5. Enfin, les flux d'azote associés au fonctionnement et aux interactions entre les quatre premiers

compartiments, déterminent en grande partie le niveau de fertilité des sols. L'analyse des flux d'azote prend en compte les différents types d'intrants (azote de synthèse, importations d'aliments pour animaux, fixation symbiotique et transferts par les fumiers) et d'exportations (productions animales et végétales) (voir la partie 1 pour plus de détails).

La demande alimentaire et non alimentaire est exogène au modèle ; les rendements et les ratios entrées-sorties pour les systèmes d'élevage sont également déterminés par l'utilisateur. Les niveaux de production pour chaque catégorie de produits agricoles et d'élevage, l'utilisation des terres et le bilan azoté sont calculés par le modèle. TYFAM est également couplé au calculateur Climagri pour calculer les émissions de GES du système alimentaire, à la fois pour la ligne de base et le scénario (voir Eglin *et al.*, 2016).

TYFAM est paramétré au niveau de l'UE, en utilisant des valeurs moyennes pour chaque paramètre ou résultat. Ces valeurs sont déterminées à partir de la base de données d'Eurostat et de l'EFSA pour la ligne de base (calibrée sur les données de 2010) ; elles sont dérivées de nos hypothèses pour le scénario (voir ci-dessous). Une telle approche à l'échelle de l'UE permet

de souscrire à l'objectif de l'exercice de prospective, qui est d'explorer dans quelles conditions une Europe agroécologique pourrait nourrir durablement et sainement 530 millions de citoyens européens d'ici 2050, tout en restaurant la biodiversité et en réduisant les émissions de GES. Le calibrage du modèle au niveau de l'UE (similaire à cet égard à GlobAgri, tel que présenté dans Mora *et al.*, 2020) est pertinent pour donner une idée de la faisabilité d'ensemble du scénario, mais pas bien sûr pour fournir une analyse détaillée des implications du scénario pour chaque région.

1.2. Hypothèses de scénario

L'élaboration d'un scénario à l'aide de TYFAM repose sur un ensemble d'hypothèses concernant la production végétale et animale, ainsi que la demande de produits alimentaires et non alimentaires. Sur cette base, TYFAM calcule ensuite l'utilisation des terres, les niveaux de production et le bilan azoté qui en résultent, ainsi que les émissions totales de GES, à l'aide du simulateur Climagri (Poux & Aubert, 2018).

L'ensemble des hypothèses qui sous-tendent le scénario TYFA vise à rendre aussi explicite que possible une approche systémique de l'agroécologie - entendue

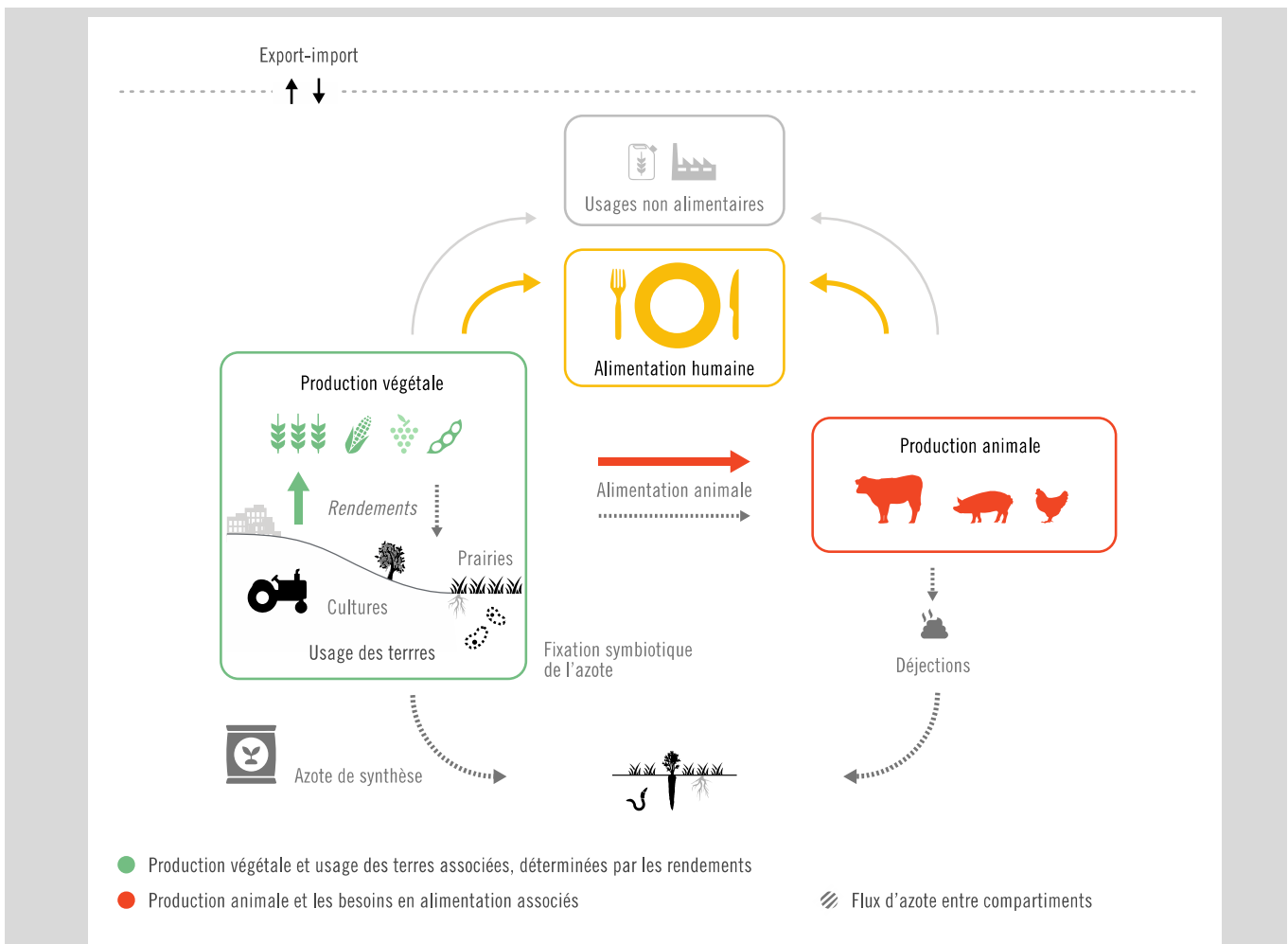


FIGURE 1 : Structure logique du modèle qui sous-tend le scénario TYFA (source: Poux & Aubert, 2018)
 Figure 1 : Logical structure of the model underpinning the TFYA scenario (source: Poux & Aubert, 2018)

ici dans sa dimension technique (distinct, donc, de sa dimension de mouvement social et de pratique - voir Wezel *et al.*, 2009). Cela revient à appliquer les concepts et principes de l'écologie à la gestion des agroécosystèmes, en tenant compte notamment des flux biogéochimiques (même si seul l'azote est modélisé dans TYFAm) et des interactions fonctionnelles entre organismes au niveau des agroécosystèmes complexes (Gliessman, 2007).

L'ensemble des hypothèses retenues pour le scénario TYFA est présenté de manière synthétique ci-dessous, dans la figure 2 et de manière plus détaillée dans Poux & Aubert (2018), qui constitue le matériel supplémentaire du présent document.



Ces hypothèses accordent un rôle central aux prairies permanentes et aux ruminants, suivant quatre axes de réflexion centraux pour TYFA :

- La première concerne le rôle central de la PP dans la fourniture de fourrage et donc *in fine* de nourriture humaine. La production de biomasse soutenant cette fonction d'approvisionnement en fourrage est alors primordiale. Pourtant, (Huyghe *et al.*, 2014) indiquent à quel point les données sur la productivité et la répartition des prairies en Europe sont rares. Il n'existe pas de statistiques uniques et centralisées sur cette production dans Eurostat, reflétant à la fois la complexité d'estimer une telle production consolidée et le rôle secondaire actuel des PP dans l'alimentation animale. Cependant, (Smit *et al.*, 2008) et (Tóth *et al.*, 2013) ont mené des recherches visant à évaluer la productivité de l'herbe, en tenant compte de la distribution spatiale des PP et des rendements associés. L'approche présentée dans ce dernier article, visant à modéliser la productivité inhérente des prairies (c'est-à-dire expliquée par la fertilité naturelle du sol, sans tenir compte de l'apport en engrais) donne un rendement moyen de 6,3 t MS/ha. Dans TYFA, nous avons supposé une productivité moyenne de 4,5 tonnes de matière sèche/ha. Cette hypothèse est censée refléter une moyenne européenne raisonnable, compte tenu d'une perte de production par rapport à la PP actuellement fertilisée et des pertes potentielles dues au changement climatique (par exemple (Dibari *et al.*, 2021) pour l'Italie).
- Les processus écologiques sur le long terme ont rendu les PP indispensables pour la préservation de la biodiversité en Europe (Pärtel *et al.*, 2005), et un peu moins de 30 % de tous les habitats que l'UE s'est fixé de conserver conformément à la Convention sur la biodiversité dépendent aujourd'hui des systèmes d'élevage extensif - et donc des PP (Halada *et al.*, 2011). Comme les PP contribuent à maintenir des niveaux élevés de biodiversité dans les agroécosystèmes, elles jouent un rôle déterminant dans la fourniture de services écosystémiques fondamentaux, parmi lesquels la pollinisation et la lutte contre les parasites (Dainese *et al.*, 2019). Le maintien de ces services écosystémiques apparaît quant à lui déterminant pour assurer la capacité productive à long terme des agroécosystèmes européens dans un contexte de stagnation des rendements et de variabilité accrue (Brisson *et al.*, 2010 ; Ray *et al.*, 2012 ; Wiesmeier *et al.*, 2015 ; Schils *et al.*, 2018), qui n'est que partiellement imputable à l'impact du changement climatique (Moore & Lobell, 2015).
- Lorsqu'elles sont gérées de manière extensive (c'est-à-dire ni semées ni fertilisées), les légumineuses peuvent représenter jusqu'à un tiers de la composition floristique et permettre ainsi une importante fixation biologique de l'azote. Dans les

PP à faible pourcentage de légumineuses, l'insuffisance apparente de l'apport d'azote par la fixation symbiotique peut être couverte par l'azote fourni par les dépôts aériens et par la fixation de l'azote par des bactéries libres, qui s'avère plus élevée dans les prairies naturelles (Roper & Gupta, 2016). (Jeffrey, 1988) affirme que "l'existence de prairies naturelles avec peu de légumineuses, et pourtant une production durable, indique que cette source d'apport de N [par les bactéries libres] peut être d'une grande importance écologique et économique. Des expériences à long terme durant une ou plusieurs saisons indiquent des gains pour les prairies de 5-90 kg N ha-1 an-1" (voir également Dobereiner & De-Polli, 1980). En tant que telles, les prairies peuvent devenir des fournisseurs fondamentaux d'azote pour le système alimentaire, bien qu'elles soient aujourd'hui parfois des puits nets d'azote en raison de leur gestion intensive (Einarsson *et al.*, 2021). Dans une telle perspective, les systèmes mixtes extensifs de ruminants peuvent devenir des fournisseurs uniques de cet azote organique vers les terres arables - dont l'impact sur le climat est, dans les zones tempérées, bien moins important que celui des engrais minéraux (Buendia *et al.*, 2019) (voir ci-dessous). Le troupeau de ruminants de TYFA a donc été ajusté de manière à faire pâturer les 60 millions d'hectares de PP à

travers l'Europe, à une moyenne de 1 unité de bétail/ha.

- Les produits laitiers et carnés issus des systèmes d'élevage extensifs ont en général une valeur nutritionnelle bien supérieure à ceux obtenus par les systèmes conventionnels, notamment en termes de teneur en oméga 3 (par exemple, Daley *et al.*, 2010).

La figure 3 illustre les différents rôles attribués aux PP et aux ruminants dans l'ensemble des hypothèses qui sous-tendent le scénario TYFA.

2. Résultats

2. 1. Une Europe agroécologique pourrait nourrir 530 millions d'Européens tout en restaurant la biodiversité et en réduisant les émissions de GES

Le premier constat de TYFA selon les hypothèses énoncées ci-dessus est que la production agricole (production végétale + production animale) est suffisante pour répondre à la demande alimentaire européenne en 2050 malgré une baisse significative de la production totale (-30 % en équivalent kcal). Ce résultat est obtenu par l'adoption généralisée d'un régime alimentaire moins calorique, plus végétal, et

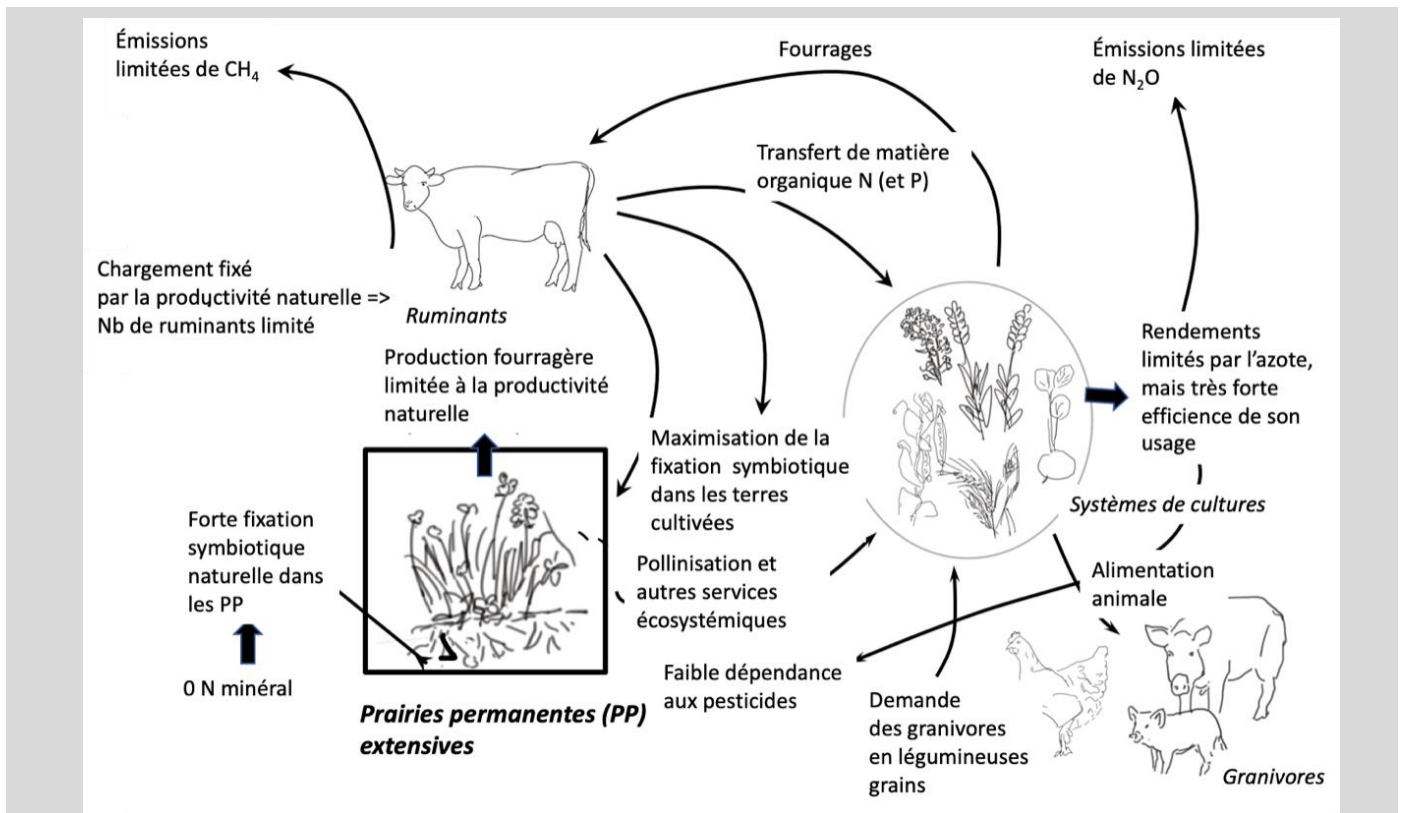


FIGURE 3 : Synthèse du rôle des PP extensives de TYFA dans le système agricole . Les flèches montrent les principales composantes et la relation de cause à effet du raisonnement (source : auteurs)
 Figure 3 : Synthesis of the role of extensive PG in TYFA in the wider agricultural system. Arrows shows the main components and causal relationship of the reasoning (source: authors)

donc ayant moins recours à la production végétale intensive (les résultats détaillés du scénario sont présentés dans Poux & Aubert, 2018).

Plus précisément, la production animale diminue de 45 % en calories, en grande partie à cause de la baisse de la production des granivores et des porcs en particulier, mais aussi des produits laitiers (-31 % entre 2010 et 2050). La réduction du cheptel de granivores est également amplifiée par le retour à une balance commerciale nulle pour ces produits - qui représentaient en 2010 10 % de la production pour les porcs et 3 % pour les volailles). Au contraire, le niveau de la production de viande bovine est maintenu à un niveau similaire à l'horizon 2050 grâce à l'extensification de la production laitière herbagère. Deux facteurs sont combinés, dont le second est déterminant dans l'équation :

- La plus faible productivité des vaches par tête nécessite un plus grand nombre d'animaux pour produire la même quantité de lait (5 500 kg/DC/an en moyenne dans TYFA, contre 6 400 kg/DC/an en 2010) ;
- Les changements dans la gestion du troupeau laitier associés à l'augmentation du nombre de lactations induisent : (i) une réduction de la proportion de génisses de remplacement (qui passe d'un tiers à un quart) et donc, mécaniquement, une augmentation des génisses d'engraissement ; (ii) un nombre plus élevé d'animaux (génisses et veaux) produits dans le cycle de vie d'une vache laitière, par kilo de lait produit. Globalement, le ratio "viande bovine laitière par kilo de lait produit" augmente en raison de l'augmentation de la descendance laitière.

La production végétale diminue de 30 % en moyenne (en kcalories), la production céréalière étant fortement réduite (-50 %) alors que les protéagineux sont multipliés par plus de quatre. Ces évolutions découlent des changements respectifs de la consommation alimentaire humaine (food) et de la consommation alimentaire animale (feed) - cette dernière représentant la plus grande partie des volumes en jeu. Cette consommation animale dépend elle-même des hypothèses concernant les systèmes d'élevage, en particulier l'utilisation des ressources fourragères des prairies temporaires et permanentes, ainsi que celles concernant les rendements de ces prairies qui, combinées, déterminent une offre en protéines animales issues des ruminants. L'évolution vers une des animaux nourris à l'herbe et moins de monogastriques réduit l'utilisation de maïs grain et, par conséquent, de protéines végétales (soja importé ou autres).

Selon les hypothèses retenues dans TYFA, la réduction globale des émissions pourrait atteindre 36 % au total, répartis entre les émissions directes et indirectes. De plus, compte tenu du fait que TYFA repose sur la suspension des importations de protéines végétales, dont une grande partie provenait de terres déforestées en Amérique latine en 2010 (Cuypers *et al.*,

2013), le potentiel de réduction des émissions de GES dans TYFA 2050 pourrait atteindre, voire dépasser, -40 %. Cette performance climatique repose sur quatre leviers principaux : (i) la réduction du cheptel, tant des ruminants (vaches laitières, bovins et petits ruminants) de 18 %, que des monogastriques de 56 % - ce qui réduit les niveaux de fermentation entérique et les émissions associées à la gestion du fumier ; (ii) une réduction globale de l'application d'azote (de plus de 20 millions de tonnes d'azote sous forme d'azote synthétique et de fumier en 2010 à 3,3 millions de tonnes d'azote organique sous forme de fumier en 2050) en raison de l'extensification de la production végétale et d'une plus grande efficacité de l'utilisation de l'azote ; (iii) le passage intégral des engrais minéraux aux engrais organiques et (iv) l'augmentation significative des légumineuses dans les rotations de cultures, permettant un arrière-effet à un niveau élevé (voir Fig. 4).

En raison des importantes baisses de rendement liées à la transition vers des systèmes biologiques, la quantité de biomasse utilisable à d'autres fins que l'alimentation dans le cadre de TYFA est limitée aux niveaux de 2010. En particulier, il n'existe aucun potentiel supplémentaire, ou un potentiel limité, pour la production de bioénergie à partir de la biomasse (que ce soit par digestion anaérobie ou par biocarburant). Nous reviendrons sur ce point dans la section discussion.

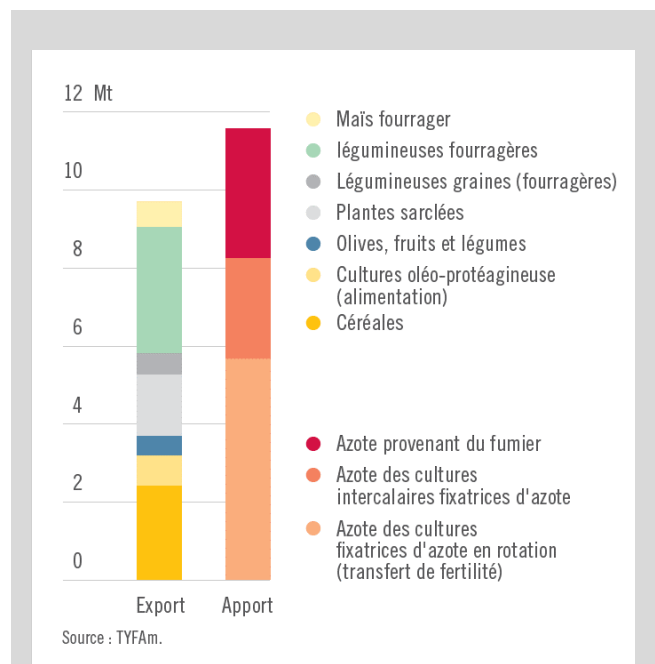


FIGURE 4 : Bilan d'azote TYFA en 2050 (source: Poux & Aubert, 2018)
Figure 4 : TYFA Nitrogen balance in 2050 (source: Poux & Aubert, 2018)

2.2. Le rôle des PP dans TYFA : fournir de l'azote, maintenir la biodiversité, produire des aliments de haute qualité nutritionnelle

Par hypothèse, les PP et les ruminants jouent un rôle prépondérant dans le scénario TYFA à trois égards : ils contribuent à l'approvisionnement en azote du système alimentaire global, au maintien de l'agrobiodiversité et à la fourniture d'aliments nutritifs aux humains. Leur rôle dans le maintien d'un haut niveau de biodiversité résulte de l'hypothèse selon laquelle les PP sont redéployées dans les paysages de l'UE et permettent d'atteindre un seuil de 20 % de végétation semi-naturelle dans chacune des petites régions (Benton *et al.*, 2003 ; Garibaldi *et al.*, 2020). Bien que la mesure dans laquelle un tel redéploiement pourrait se produire dans l'UE fait l'objet d'une discussion plus approfondie dans la section suivante, il ne s'agit pas d'un résultat des calculs effectués avec TYFAM, mais plutôt d'une conséquence plausible de nos hypothèses.

Il en va de même pour l'apport d'aliments nutritifs, qui est la conséquence directe des hypothèses faites sur les systèmes de ruminants : deux systèmes laitiers sont en effet paramétrés sous TYFA. Le premier, qui représente 30 % de la production laitière, est principalement nourri à l'herbe, avec seulement 100 kg de concentré/vache laitière (VL)/an et a un rendement moyen de 5 000l/VL/an. Le second, qui représente 70 % de la production laitière, a un rendement moyen de 5 700 l/vache laitière/an et repose sur l'hypothèse de 700 kg de concentré/vache laitière/an. Les deux systèmes sont associés à la production de viande par l'engraissement des génisses non destinées au renouvellement et de tous les mâles. Dans tous les cas, la part d'herbe dans la ration globale conduit à une qualité nutritionnelle supérieure à celle des produits laitiers et carnés nourris aux céréales (Daley *et al.*, 2010).

La contribution relative des PP et des ruminants au bilan azoté du scénario mérite enfin quelques explications supplémentaires. Le bilan azoté de TYFA (voir figure 4) montre tout d'abord que l'apport en azote des cultures fixatrices d'azote en rotation (y compris les cultures intercalaires et les prairies temporaires) couvre 70 % des besoins des cultures.

Dans le scénario, les 30 % restants des besoins en azote sont couverts par les fumiers, déduction faite des pertes dues aux émissions d'ammoniac. Sur ce total, 20 % proviennent des systèmes monogastriques et 80 % des systèmes ruminants. Les quantités mobilisables dépendent (i) du nombre total d'animaux et (ii) du temps passé à l'intérieur et à l'extérieur pour chaque catégorie d'animaux. Le tableau 1 ci-après explicite les hypothèses faites à cet égard pour chaque type de système d'élevage.

Sur cette base, le transfert net d'azote des PP vers les terres cultivées dépend finalement de la part d'herbe des PP dans la ration alimentaire globale. Ici, les

hypothèses de TYFA sont qu'en moyenne, les PP fournissent en moyenne 70 % de l'alimentation nécessaire (en matière sèche) pour tous les ruminants (systèmes laitiers, bovins, petits ruminants). Cela signifie un transfert net d'azote des PP vers les terres cultivées d'un peu moins de 20 % des besoins en azote des cultures, la principale source d'azote du système reposant sur l'arrière-effet des légumineuses dans les rotations de cultures.

Dans l'ensemble, le rôle clé joué par les PP dans la fermeture du cycle organique de l'azote dans TYFA a des conséquences positives en cascade sur la production (plus faible qu'actuellement, mais renforçant la contribution des services écosystémiques en jeu), la biodiversité, la gestion des ressources naturelles et le climat. Cet ensemble de services clés repose en grande partie sur le cycle de l'azote durable induit par la complémentarité entre PP et cultures arables, qui doit donc être appréhendé dans son ensemble. En tant que pierre angulaire de TYFA, ce rôle dévolu aux PP nécessite une discussion plus approfondie avec la littérature existante, sur laquelle nous nous penchons maintenant.

Type d'animal	Temps passé dans le logement /an (N gérable)	Commentaire
Vaches laitières	90 %	Les vaches laitières restent dans ou à proximité des bâtiments
Vaches allaitantes, génisses, veaux de 1 à 2 ans, moutons et chèvres	50 %	Les pâturages en saison chaude et en bâtiments en hiver.
Génisses, veaux 3 ans	70 %	L'engraissement nécessite plus de temps dans les bâtiments
Granivores	100 %	Systèmes en bâtiments

TABLEAU 1 : Hypothèses concernant le temps passé dans le logement pour les animaux et la fraction de N gérable qui en résulte

Table 1 : Assumptions regarding time spent in housing for animals and the resulting fraction of manageable N

3. Discussion

3.1. Sur la capacité à fournir de l'azote à partir des PP

Globalement, la capacité des PP extensives à fournir durablement des aliments et des services écosystémiques est déterminée par l'équilibre entre : (a) la quantité maximale de N qu'ils peuvent fixer par fixation symbiotique et non symbiotique, ainsi que la quantité de N résultant des dépôts aériens et (b) l'exportation nette ultérieure de N par les ruminants sous forme de lait, de viande et de fumier.

Dans les scénarios de systèmes alimentaires récemment publiés, l'hypothèse implicite est que les PP sont des puits nets de N et ne peuvent donc pas fournir de N au reste du système alimentaire - car elles sont basées sur des données empiriques concernant le fonctionnement *actuel* des PP (Einarsson *et al.*, 2021). Par exemple, dans les scénarios de systèmes alimentaires biologiques publiés par Barbieri *et al.*,

(2021) ou Karlsson & Røos (2019), les PP sont modélisées comme des puits nets de N, et non comme des sources potentielles, comme l'illustre la figure 5 ci-dessous - et contrairement à TYFA. La pénurie d'azote totale résultant d'un usage exclusif de la fixation symbiotique dans les systèmes de cultures s'élève ainsi à 40-60 % pour Barbieri *et al.* au niveau mondial, et à 21-28 % pour Karlsson & Røos en considérant les régions nordiques. Cela mérite une explication plus approfondie.

Les hypothèses de TYFA concernant l'approvisionnement et l'exportation de N dans les PP sont les suivantes. En ce qui concerne les exportations nettes, notre structure moyenne de troupeau et nos hypothèses sur l'exportation de fumier (40 % de restitution de N aux PP tout au long de l'année) conduisent à un besoin net de N d'environ 90-130 kg N/ha/an qui doit être couvert par des intrants naturels.

Du côté de l'offre, la modélisation TYFA suppose un rendement de 4,5 tonnes de matière sèche/ha de PP ; cette contribution est prise en compte en tant que "boîte

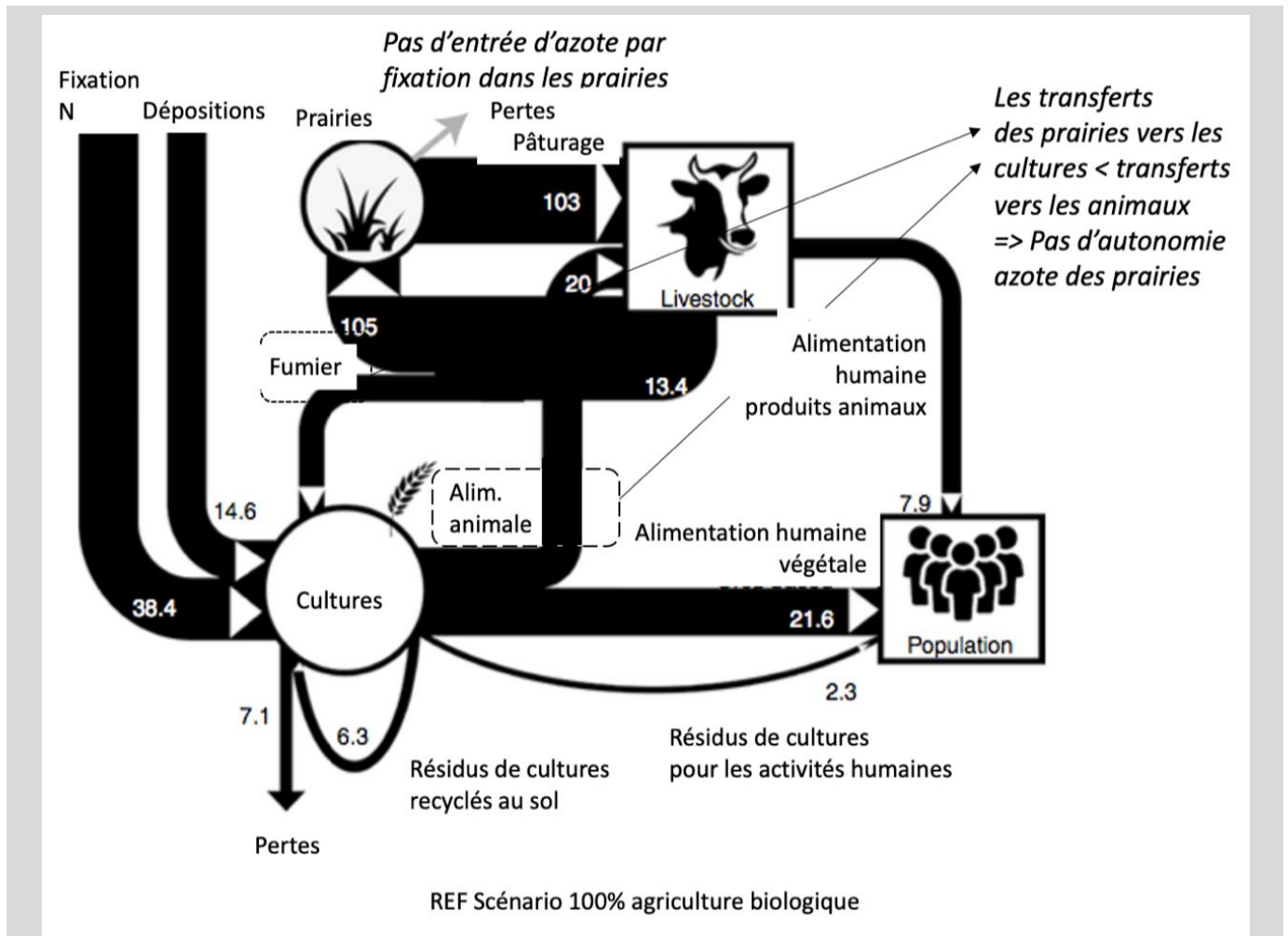


FIGURE 5 : Représentation des flux de N dans (Barbieri 2021), exprimés en TgN. Les italiques, les flèches et la boîte en pointillés sont nos ajouts. Dans cette figure, il n'y a pas de fixation de N comptabilisée dans les PP, et donc pas de transfert vers les terres cultivées, contrairement à TYFA.

Figure 5 : N flows representation in (Barbieri 2021), amounts in TgN. Italics, arrows and dashed box are our addition. In this figure, there is no N fixation accounted for in PG, and thus no transfer to cropland, unlike TYFA.

noire" dans le modèle et supposée, sur une base empirique, être suffisante pour couvrir les besoins en fourrage de la production laitière extensive (suite aux résultats empiriques et à une méta-analyse présentés respectivement dans Bignal, 2000 ; Smit *et al.*, 2008). Néanmoins, la question se pose de savoir si une gestion extensive des PP selon ces hypothèses de rendement permettrait de boucler le cycle de l'azote, ou bien si elle conduirait plutôt à sa surexploitation, en raison des niveaux beaucoup plus faibles de fourniture d'azote vers les PP par rapport à la fourniture minérale actuelle. D'autres discussions depuis l'édition de TYFA en 2018 nous ont amenés à approfondir nos hypothèses concernant cette question. Dans notre étude de 2018, nous avons supposé une part de 30 % de légumineuses dans les PP, permettant une fixation de 180 kg de N par les légumineuses en moyenne (hors-sol et souterrain), et donc suffisante pour couvrir les besoins. Cependant, cette valeur de 30 % avait été discutée comme étant trop optimiste car, par exemple, la moyenne n'est que de 10 % dans un large échantillon de PP françaises (Jeuffroy *et al.*, 2015). Les modèles actuels suggèrent également un apport de N par la fixation symbiotique autour de 70-80 kg/ha, ce qui est nettement inférieur à notre hypothèse d'exportation nette. Cependant, ces modèles sont statistiques et calibrés sur des données couvrant une grande variété de prairies, parmi lesquelles certaines sont fertilisées (comme le montrent Einarsson *et al.*, 2021) et ne reflètent donc pas la spécificité des prairies véritablement semi-naturelles. Selon Jeuffroy *et al.* (2015), une part plus importante de légumineuses est en effet rencontrée dans les prairies extensives de l'échantillon, reflétant l'antagonisme entre la fertilisation azotée et l'abondance des légumineuses. Cette affirmation renforce l'hypothèse d'une augmentation des légumineuses en moyenne dans les PP alors que la fertilisation diminuerait dans les TYFA. De plus, ces PP extensives ont été largement sous-étudiées et mesurées en tant que telles, alors que les mécanismes biologiques en jeu sont intrinsèquement différents de ceux des systèmes fertilisés (Jeffrey, 1988). Nous réitérons ici le rôle potentiel des bactéries libres dans la fixation de l'azote évoqué plus haut (Roper & Gupta, 2016). (Jeffrey, 1988) (Dobereiner & De-Polli, 1980).

En somme, il est nécessaire de poursuivre les recherches dans ce domaine. En résumé, l'hypothèse de TYFA sur l'approvisionnement en N par les PP extensives est qu'un tel écosystème à faible apport développe un mécanisme de fixation de N - et d'autres fonctions biologiques - intrinsèquement différent d'une PP avec un stock et/ou un apport élevé de N minéral, conduisant à des niveaux suffisants d'azote (Loiseau *et al.*, 2005). Une telle hypothèse devrait être confrontée à des données empiriques qui sont aujourd'hui limitées, comme évoqué ci-dessus. Cependant, nous pouvons noter que (Tilman *et al.*, 1996) a mené une recherche renforçant nos hypothèses générales sur la biodiversité, associée à une productivité soutenue de l'herbe.

Le fait que TYFA ne tienne pas compte des flux de phosphore, en raison de l'absence de modèle capable de modéliser son cycle dans le système alimentaire en comparaison avec l'azote par exemple, soulève une discussion sur cette perspective. En effet, une analyse plus approfondie devrait être faite dans cette perspective, car la pénurie de phosphore pourrait être un facteur limitant pour la fixation de l'azote qui est au centre de notre raisonnement. Bien que cet élément ne soit pas limitant à l'heure actuelle, en raison des quantités historiques d'approvisionnement dépassant les besoins et de la stabilité relative de cet élément, il est identifié comme potentiellement manquant dans un futur proche, du moins sous sa forme de minéral extrait (Cordell *et al.*, 2009). Bien que nous n'ayons pas approfondi cette discussion, nous trouvons inspirantes les perspectives ouvertes par (Faucon *et al.*, 2015) dans la gestion et l'approvisionnement du phosphore dans les systèmes agroécologiques. Il rapporte notamment l'importance de la matière organique du sol dans l'activité microbienne et rhizosphérique du sol, en relation avec la mobilisation du phosphore dans le sol et la rétroaction positive plante-sol sur la disponibilité du P dans les systèmes de cultures et de prairies multi-espèces. En outre, les hypothèses de TYFA concernant la couverture des sols en hiver et la présence de caractéristiques agro-écologiques dans le paysage sont des éléments clés pour prévenir l'érosion, principale cause des pertes de phosphore. Une discussion similaire pourrait être menée sur la question du potassium, beaucoup moins étudiée dans la littérature alors que des préoccupations peuvent survenir à plus long terme (Kayser & Isselstein, 2005). Cette publication suggère que des niveaux plus faibles d'apports de potassium, en accord avec les hypothèses de TYFA, réduisent considérablement le risque de lixiviation et conduiraient à une gestion plus durable du calcium et du magnésium, la question de savoir d'où vient ce potassium restant ouverte. Pour rester dans le cadre de la gestion de la fertilité, un autre point de discussion peut être proposé concernant la stœchiométrie globale entre les éléments C, N et P. De même que pour P et K, cette question n'a pas pu être abordée dans notre scénario, alors qu'elle affecte la productivité globale des prairies et des cultures. Dans cette perspective, TYFA présente des hypothèses cohérentes avec des sols riches en biodiversité, avec une variété de micro-organismes proprement nourris avec des apports C/N correspondant à leurs besoins et susceptibles de stocker/libérer les éléments chimiques du sol (Mooshammer *et al.*, 2014).

3.2. De l'approvisionnement en azote au transfert d'azote : rôle et défis du redéploiement spatial des PP

Non seulement TYFA repose sur un apport net d'azote par les PP, mais il est également supposé que cet azote peut être transféré aux terres cultivées. Au-delà de la question de la gestion du fumier - pour laquelle des

hypothèses ont été présentées ci-dessus - l'une des principales questions soulevées par TYFA est de savoir dans quelle mesure il serait possible de redéployer spatialement les PP à travers l'Europe. Cela impliquerait une double dynamique de "désécialisation" : des régions dominées par les cultures d'une part, où les PP peuvent ne représenter que 1,5 % de la surface agricole utile actuellement ; et des zones de prairies vers des systèmes mixtes. Une alternative, qui existe encore dans les régions méditerranéennes, consiste en des transferts d'azote par transhumance dans des régions pourtant dominées par les cultures (par exemple, Castilla y León en Espagne). Trois points permettent de préciser la discussion sur la faisabilité de cette double dynamique de redéploiement des prairies et de désécialisation des surfaces de grandes cultures :

- Les régions tempérées d'Europe (hors zone méditerranéenne) très spécialisées dans la production de grandes cultures sont en fait l'exception. Il s'agit notamment de la région Île-de-France en France, ainsi que de certaines parties de l'Allemagne et de la Hongrie ; ailleurs, un seuil de prairies permanentes de 8 à 15 %, voire de 15 à 24 %, est plus courant.
- Dans les régions méditerranéennes, où les prairies permanentes herbacées sont peu fréquentes, certaines formes de végétation semi-naturelle existent, permettant d'envisager des complémentarités par la transhumance (mais la part d'azote assimilable doit alors être précisée).
- A l'inverse, les régions véritablement spécialisées dans l'élevage à l'herbe sont minoritaires (les îles britanniques et le Massif central en France) et présentent un potentiel agricole de retour partiel aux cultures, comme le suggèrent les données historiques.

Le redéploiement des systèmes de polyculture-élevage au niveau territorial (Martin *et al.*, 2016 ; Ryschawy *et al.*, 2017) à travers l'Europe n'est donc pas toujours aussi difficile que dans les quelques régions spécialisées en grandes cultures. Pourtant, les défis socio-économiques d'une telle désécialisation ne peuvent être négligés, car cela irait à l'encontre des tendances massives qui ont affecté l'UE au cours des dernières décennies : l'abandon des PP dans les zones marginales, le labour des PP dans les zones favorables aux cultures, et la forte intensification des PP dans les zones favorables aux graminées (Peeters, 2009).

Cependant, si notre analyse est ici centrée sur les PP, le rôle des prairies temporaires artificielles doit être évoqué comme une composante à part entière des systèmes agricoles, notamment dans les zones dominées par les terres arables. Dans cette perspective, le rôle de la rotation prairies cultivées-cultures associée aux ruminants est triple : (1) apport d'azote par effet de report direct (ex : luzerne dans les rotations céréalières) ; (2) apport de carbone, permettant un bon couplage C et N ; (3) effet "nettoyant" sur les adventices, permettant

ainsi des systèmes sans pesticides (Lemaire *et al.*, 2015). Ces prairies cultivées seront associées à des systèmes d'élevage de ruminants à plus forte productivité.

3.3. Les implications nutritionnelles de la valorisation des PP et des ruminants

La nécessité de réduire de manière significative l'apport en protéines animales pour les humains des pays de l'OCDE à des fins d'atténuation du changement climatique est largement reconnue (Clark *et al.*, 2020). Le débat sur le régime alimentaire est donc devenu une question clé dans les scénarios traitant de ce sujet, et TYFA ne fait pas exception. Il suppose ainsi une réduction de moitié de la consommation de viande et de produits laitiers, conforme aux recommandations alimentaires. Pourtant, le rôle des PP dans TYFA accorde une importance relativement plus grande aux aliments d'origine animale provenant de ruminants que de monogastriques - en cohérence avec l'approche systémique adoptée (Frehner *et al.*, 2020). À ce titre, elle considère qu'un avantage majeur des ruminants est leur capacité à se nourrir de végétation non comestible par l'Homme, autrement dit des produits de la PP, qui est au cœur de cet article (comme proposé dans Van Zanten *et al.*, 2016 ; Van Zanten *et al.*, 2018). Dans cette perspective, considérant que toutes les terres agricoles ne sont pas cultivables, la production de viande et d'aliments laitiers à partir de PP ne sont pas des utilisations inefficaces des terres mais sont, au contraire, la meilleure utilisation alimentaire des terres non arables (voir également Van Kernebeek *et al.*, 2016). Dans une perspective plus large, cette source complémentaire de calories réduit le besoin de produire de la nourriture sur la surface limitée des terres arables, et ainsi le besoin d'intensifier sur cette zone. Cette différence fondamentale entre l'alimentation des animaux avec des céréales et celle avec des aliments non comestibles par l'Homme fait des ruminants les utilisateurs de terres les plus efficaces, à condition qu'ils soient effectivement nourris grâce aux PP (Wilkinson, 2011 ; Mottet *et al.*, 2017). Ces hypothèses sont cohérentes avec les conclusions de van Selm *et al.* (2022), qui proposent de prendre en compte le recyclage des ressources dans les scénarios. Une part équilibrée de ruminants/PP conduit à de meilleures performances, y compris en termes d'émissions de GES, par rapport aux régimes minimisant cette part, par exemple celui de référence EAT-Lancet (comme dans Willett *et al.*, 2019).

Dans TYFA, l'objectif de conserver la surface globale en PP et de réduire leur productivité moyenne à 4,5 tonnes de matière sèche/ha (en supposant que cela corresponde à la productivité des PP semi-naturelles sans intrants) conduit à une réduction de la production laitière de 34 % et au quasi-maintien de la viande de ruminants. Ce dernier résultat provient de l'extensification du cheptel laitier, conduisant à plus de viande co-produite par tonne de lait (en gros : remplacer une vache à 10 000 l de lait/an par deux vaches à 5 000

l/an double le nombre de veaux/lait produit). Il faut noter que si la part d'herbe dans l'alimentation des ruminants augmente, les vaches laitières conservent une part de fourrages cultivés et de compléments alimentaires concentrés.

Dans l'ensemble, le régime alimentaire des Européens qui en résulte fait passer la part de la viande de ruminants de 15 % en 2010 à 35 %, conservant la majorité de l'offre de viande aux porcs et aux volailles : la viande des monogastriques s'élève encore à 56 g/personne/jour dans le scénario (contre 140 g aujourd'hui), ce qui représente environ 65 % de l'ensemble de la consommation carnée (contre 80 % aujourd'hui). Les monogastriques sont en effet essentiels pour valoriser et justifier les légumineuses en rotation, contribuant à remplacer le soja importé par des légumineuses cultivées et contribuer ainsi à la fixation symbiotique de l'azote sur la part arable des terres agricoles de l'UE. En tant que tel, le régime alimentaire de TYFA - et d'autres régimes dans des modélisations similaires - n'est pas végétalien mais "flexitarien", avec une part relativement élevée de viande rouge par rapport à d'autres régimes alimentaires modélisés.

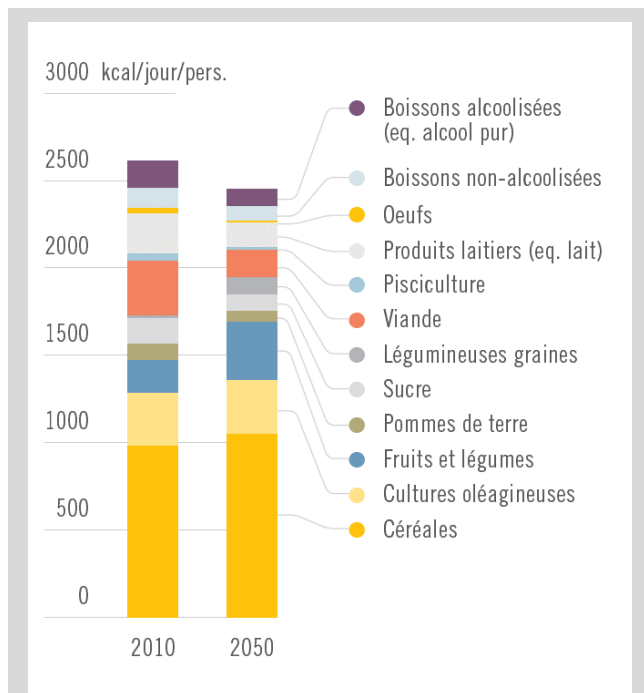


FIGURE 6 : Hypothèses de TYFA sur les régimes alimentaires par rapport à 2010 (moyennes de l'UE) (source : (Poux & Aubert, 2018))

Figure 6 : TYFA's assumptions on diets compared to 2010 (EU averages) (source: Poux & Aubert, 2018)

3.4. PP, ruminants et changement climatique

Une hypothèse centrale de TYFA est que pour que les PP fournissent pleinement le potentiel des services écosystémiques, elles doivent être pâturées/fauchées autant que possible par/pour des ruminants, selon des

modèles extensifs. Par conséquent, la réduction du troupeau de ruminants dans TYFA est modérée par rapport à la plupart des scénarios de systèmes alimentaires durables (Solagro *et al.*, 2016 ; Lóránt & Allen, 2019 ; Willett *et al.*, 2019). Cela contribue à son tour à expliquer le potentiel de réduction des émissions de GES de TYFA, qui varie - exprimé en PRG100 - de -36 à -40 % par rapport à 2010. Dans le même temps, l'utilisation potentielle de la biomasse pour d'autres usages que l'alimentation reste limitée par les baisses de rendement et le maintien des PP. Ces deux aspects questionnent la compatibilité de TYFA avec l'objectif de neutralité carbone au niveau de l'UE d'ici 2050 (CE, 2018 ; ECF, 2018 ; Aubert *et al.*, 2019). Il convient toutefois de replacer ce constat dans une perspective plus large en accordant plus d'attention à trois aspects au moins.

Le premier concerne l'évaluation de l'impact climatique des ruminants en ce qui concerne leurs émissions de méthane. La plupart des raisonnements sont basés sur l'utilisation d'un PRG100 exprimé en tCO₂ eq. Cette métrique pourtant de référence ne tient pas compte de la courte durée de vie du méthane, dont l'impact sur la température est très fort mais ne dure pas (effet "flash"), du fait que la moitié des molécules se décomposent en CO₂ + H₂O après une période de 12 ans. Lorsque le méthane provient d'un cycle biogénique (c'est-à-dire dans un cycle actuel, par opposition à la libération de méthane fossile), ce qui est le cas de l'agriculture, l'émission de CO₂ en fin de cycle est "compensée" par le CO₂ fixé initialement dans le cycle par la photosynthèse. Cette particularité modifie complètement la compréhension de l'impact des émissions de méthane sur le changement climatique : un niveau stable d'émissions de méthane biogénique d'un secteur n'augmente pas, en première approche, la température du globe (l'élevage dans notre cas, mais il en va de même pour les cultures irriguées comme le riz). Réciproquement, une augmentation ou une diminution des émissions conduira respectivement à une augmentation de la température (augmentation du puissant effet flash du CH₄) ou, en cas de diminution, à un effet dit de "refroidissement" (Allen *et al.*, 2018b ; Lynch *et al.*, 2021). Une analyse plus fine prenant en compte le pouvoir réchauffant de l'effet flash du méthane sur les océans et dans l'atmosphère fait que l'impact neutre des émissions de méthane est obtenu pour des changements de -10 à -15 % en 12 ans (Allen *et al.*, 2018a). Pour appréhender pleinement le potentiel d'atténuation de TYFA, il faut donc considérer la réduction relative de tous les gaz, en tenant compte du comportement atmosphérique différentiel. Dans cette perspective, le remodelage complet du cycle de l'azote a des effets importants qui pourraient l'emporter sur la réduction limitée des émissions de méthane : une élimination des émissions de CO₂ associées à la production d'azote synthétique par Haber-Bosch, une forte réduction de N₂O *via* une division d'un facteur 6 des apports de fertilisants azotés (de plus de 20 millions

de tonnes sous forme d'azote synthétique et de fumier en 2010 à 3,3 Mt d'azote organique sous forme de fumier en 2050) et le passage intégral des engrais minéraux aux engrais organiques, dont le facteur d'émission est 2,6 fois inférieur (Buendia *et al.*, 2019).

Un deuxième aspect à mieux prendre en compte est la possibilité - explorée dans une variante de TYFA appelée TYFA-GES - d'utiliser une partie de l'herbe produite sur les prairies pour produire du biogaz par digestion anaérobie (Aubert *et al.*, 2019). L'intérêt est triple : réduire le nombre de ruminants nécessaires au pâturage de 60 millions d'hectares de prairies (réduction de 34 % des UGB de ruminants par rapport à 2010, contre 18 % dans le scénario TYFA initial) ; maintenir les prairies en conservant une partie de leurs services écosystémiques associés en les utilisant pour la production de biogaz une année sur cinq seulement ; et produire de la bioénergie pour remplacer les énergies fossiles. Cette option a également été explorée par Kizekova *et al.* (2018) en Slovaquie. Sans pouvoir fixer une limite précise à partir de laquelle le développement de la méthanisation à partir de prairies conduirait à un passage à une logique bioénergétique qui changerait la nature même de l'agroécologie envisagée, il convient néanmoins de rappeler que l'échelle change la nature même de la filière et la logique de gestion des prairies et que leur usage pour la méthanisation doit alors être envisagée avec précaution.

Le dernier aspect concernant le climat porte sur l'adaptation au changement climatique. Si TYFA ne maximise pas la contribution à l'objectif de neutralité carbone, le scénario conduit à une capacité d'adaptation grandement améliorée de la plupart des agroécosystèmes à travers l'Europe grâce à la rediversification significative des systèmes végétaux (Lin, 2011 ; Muneret *et al.*, 2018), la reconnexion des systèmes de culture et d'élevage et l'amélioration de la santé des sols (Mäder *et al.*, 2000 ; Gattinger *et al.*, 2012). Ce sont des aspects clés qui contribueraient à augmenter à l'adaptation à l'augmentation du stress hydrique, l'émergence de nouveaux parasites/maladies, ou encore l'irrégularité des précipitations. En résumé, les limites de TYFA concernant la neutralité carbone par rapport à d'autres scénarios interrogent en retour ces derniers sur leur capacité à faire face à l'adaptation au changement climatique et donc sur leur résilience globale.

Conclusion : une révision du rôle des PP et des ruminants dans l'agenda de la durabilité et des besoins de recherche.

Dans les scénarios actuels du système alimentaire de l'UE, les PP sont davantage considérées comme un problème que comme une solution quelconque. Dans le meilleur des cas, elles sont limitées aux zones où elles constituent la seule utilisation possible des terres, et où

une certaine densité de ruminants peut être acceptée pour la liste des services qu'ils fournissent. Dans le pire des cas, ils sont remplacés par des forêts ou des cultures pour la production de bio-énergies. Nous avons discuté des limites conceptuelles de ces approches et proposé un scénario basé sur un cadrage alternatif des problèmes, combinant un lien original biodiversité/PP/ruminants/changement climatique. En utilisant le modèle de biomasse développé dans TYFA, nous avons intégré un scénario pour l'UE qui conduit à des résultats positifs pour une alimentation saine, pour la biodiversité, les ressources naturelles et le climat. Nous insistons sur la nécessité d'adopter un régime alimentaire plus sain, en réduisant de moitié les apports en viande et en produits laitiers pour y parvenir.

Le rôle des PP et des ruminants dans ce modèle doit être compris en relation avec ce qu'ils apportent aux systèmes de culture. Une idée clé est que le fonctionnement semi-naturel des PP fournit une série de services (fixation de l'azote, matière organique, auxiliaires biologiques) qui peuvent être transférés aux systèmes de culture par les ruminants. Nous avons également discuté de la manière dont l'impact des ruminants sur le changement climatique devrait être révisé et placé dans une analyse plus large, dans laquelle la gestion de l'azote et les émissions de N₂O associées devraient être pris en compte et mise en regard des émissions de méthane.

Au-delà des éléments d'argumentation de nature biotechnique que nous souhaitons apporter dans l'éventail des études futures traitant des systèmes alimentaires durables avec TYFA, il est clair que les changements sociaux et économiques induits par un tel scénario ne sont pas abordés dans cet article. Pour n'en citer que quelques-uns : la reconnexion entre les cultures et l'élevage au niveau des exploitations et les besoins en main d'œuvre dans un contexte de concentration des exploitations ; les changements de flux dans la chaîne alimentaire et donc le modèle économique des industries alimentaires et de la distribution et, enfin, la capacité à payer des consommateurs. Bien que ces questions clés n'entrent pas dans le cadre de la modélisation biophysique de TYFA présentée ici, elles doivent être examinées plus en détail pour assurer la cohérence de l'approche globale du scénario. Certains aspects ont été étudiés jusqu'à présent (Aubert *et al.*, 2021), que nous ne développons pas ici. Mais nous pouvons rappeler que les difficultés et les défis d'un tel scénario ne doivent pas être comparés à la situation actuelle, mais à d'autres futurs plausibles pour la production et la consommation alimentaire en 2050. Dans cette perspective, TYFA doit être compris comme une alternative à une crise de production possible et plausible de l'agriculture européenne causée par la combinaison du changement climatique, de l'effondrement de la biodiversité au niveau des paysages et des sols et de l'épuisement des ressources énergétiques et/ou minérales. Les défis dans les domaines socio-économique et politique pourraient

être ainsi d'une ampleur comparable à ceux induits par nos hypothèses. En comparaison, les conditions socio-économiques et politiques pour TYFA pourraient devenir plus crédibles qu'elles ne le sont aujourd'hui.

Sur cette base, nous plaçons pour un changement complet de l'orientation et de la conception des politiques européennes. Tout d'abord, il est nécessaire de rééquilibrer l'agenda en faveur de la conservation de la biodiversité liée à l'agriculture et à l'élevage. Plus précisément, les objectifs politiques devraient aller au-delà de la conservation des zones à Haute Valeur Naturelle existantes (Veen *et al.*, 2009) - qui constituent néanmoins un objectif en soi - et du développement des haies et autres éléments paysagers linéaires et ponctuels dans le cadre de la conditionnalité de la PAC. Des politiques volontaires et bien financées devraient soutenir le maintien des PP extensives et des systèmes ruminants associés, y compris - et dans une certaine mesure en priorité - dans les zones où ce type de systèmes d'élevage a disparu ou est en passe de disparaître. Grâce au transfert de fertilité permis dans ces systèmes mixtes, nous identifions une voie vers des systèmes plus autonomes et plus résilients.

Au moment de la rédaction de ce document (en juin 2022, pendant la guerre russo-ukrainienne), nous soutenons fermement que cette orientation est probablement la plus résiliente pour réduire la dépendance de l'ensemble de l'agriculture à l'énergie fossile, et que favoriser la fixation naturelle de l'azote dans les PP est un enjeu majeur pour la souveraineté alimentaire de l'UE, ainsi que pour répondre aux agendas de la biodiversité et du climat.

Ouvrir la voie à des politiques allant dans ce sens ouvre différentes perspectives de recherche. Nous les organisons en fonction du niveau d'organisation auquel elles s'adressent :

- le système d'exploitation (gestion des prairies, gestion et élevage du bétail, polyculture intégrée...), en mettant l'accent sur une meilleure compréhension de ce qui se passe dans le sol en termes de cycle et de fixation du carbone et de l'azote (ce qui, de fait, est peu abordé dans la littérature lorsqu'il s'agit de prairies extensives) ;
- le paysage et le territoire, la conception de la coopération à ce niveau reflétant une utilisation intégrée des terres, répondant aux objectifs environnementaux et économiques. Ce niveau inclut les sciences sociales (les sciences participatives par exemple) ;
- la chaîne alimentaire, et notamment sa capacité à valoriser pleinement les actifs résultant des systèmes intégrés PP/cultures;
- la conception des politiques au sens large, qui néglige actuellement la contribution des PP à la plupart des objectifs assignés à un système alimentaire durable. Dans ce domaine, il est nécessaire de mieux valoriser les cadres

methodologiques montrant les performances en matière de biodiversité, de climat et de santé des systèmes mixtes intégrés par rapport à ceux basés sur des métriques réductionnistes. Pour que ces méthodologies aient une influence sur la prise de décision politique, il faut les associer à une analyse socio-économique solide, révélant les avantages globaux pour l'UE et le reste du monde.

Article accepté pour publication le 04 avril 2023

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen M.R., Cain M., Lynch J., *et al.*, (2018a). "Climate metrics for ruminants". Oxford, Oxford Martin Programme on Climate Pollutants, 4 p.
- Allen M.R., Shine K.P., Fuglestedt J.S., *et al.*, (2018b). "A solution to the misrepresentations of CO₂-equivalent emissions of short-lived climate pollutants under ambitious mitigation". *npj Climate and Atmospheric Science*, 1 (1), 16.
- Aubert P.-M., Schwoob M.-H. & Poux X., (2019). "Agroecology and carbon neutrality in Europe by 2050: what are the issues? Findings from the TYFA modelling exercise." Paris, Idri Study.
- Aubert P.-M., Gardin B., & Alliot C., (2021). "Vers une transition juste des systèmes alimentaires, enjeux et leviers politiques pour la France" (p. 76). IDDRI - BASIC.
- Barbieri P., Pellerin S., Seufert V. *et al.*, (2021). "Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability". *Nature Food*, 2 (5), 363-372.
- Bengtsson J., Bullock J.M., Egoh B. *et al.*, (2019). "Grasslands—more important for ecosystem services than you might think". *Ecosphere*, 10 (2), e02582.
- Benton T.G., Vickery J.A. & Wilson J.D., (2003). "Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?". *Trends in Ecology & Evolution*, 18 (4), 182-188.
- Signal E., (2000). "The environmental impact of dairy production in the EU - practical options for the improvement of the environmental impact". *European Commission (DGXI) CEAS*, 1179.
- Billen G., Le Noë J. & Garnier J., (2018). "Two contrasted future scenarios for the French agro-food system". *Science of the Total Environment*, 637, 695-705.
- Billen G., Aguilera E., Einarsson R. *et al.*, (2021). "Reshaping the European agro-food system and closing its nitrogen cycle: The potential of combining dietary change, agroecology, and circularity". *One Earth*, 4 (6), 839-850.
- Brisson N., Gate P., Gouache D. *et al.*, (2010). "Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France". *Field Crops Research*, 119 (1), 201-212.
- Buendia E.C., Guendehou S., Limmeechokchai B. *et al.*, (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* Geneva, IPCC.
- Clark M.A., Domingo N.G.G., Colgan K. *et al.*, (2020). "Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets". *Science*, 370, 705-708.
- Cordell D., Schmid-Neset S., & White J.-O., (2009). "Preferred Future Phosphorus Scenarios: A framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand". In K. I. Ashley, D. Mavinic, & F. Koch (Éds.), *International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams: May 10-13, 2009, the Westin Bayshore Hotel and Resort, Vancouver, British Columbia, Canada*. IWA Publishing.
- Cuypers D., Geerken T., Gorissen L. *et al.*, (2013). *The impact of EU consumption on deforestation: Comprehensive analysis of the impact of EU consumption on deforestation*. Brussels, European Commission – DG Environment, 108 p.

- D'Ottavio P., Francioni M., Trozzo L. *et al.*, (2018). "Trends and approaches in the analysis of ecosystem services provided by grazing systems: A review". *Grass and Forage Science*, 73 (1), 15-25.
- Dainese M., Martin E.A., Aizen M.A. *et al.*, (2019). "A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production". *Science Advances*, 5 (10), 13.
- Daley C.A., Abbott A., Doyle P.S. *et al.*, (2010). "A review of fatty acid profiles and antioxidant content in grass-fed and grain-fed beef". *Nutrition Journal*, 9 (1), 10.
- Dibari C., Pulina A., Argenti G., Aglietti C., Bindi M., Moriondo M., Mula L., Pasqui M., Seddaiu G., & Roggero P. P., (2021). "Climate change impacts on the Alpine, Continental and Mediterranean grassland systems of Italy: A review". *Italian Journal of Agronomy*, 16(3).
- Dobereiner J. & De-Polli H., (1980). "Diazotrophic rhizocoenoses – Nitrogen fixation". *Proceedings of the Phytochemical Society of Europe symposium*, 18, 301-344.
- Duru M., Aubert P.-M., Couturier C. *et al.*, (2021). "Scénarios de systèmes alimentaires à l'horizon 2050 au niveau européen et français : quels éclairages pour les politiques publiques?" *Revue AE&S*, 11 (1).
- EC, (2018). *A Clean Planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*. Brussels, European Commission / In depth analysis in support of the Commission Communication COM(2018) 773, 291 p.
- EC, (2020). *Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. Brussels, European Union, 22 p.
- ECF, (2018). *Net Zero By 2050: From Whether to How*. Brussels, European Climate Foundation – Climact, 66 p.
- EEA & FOEN, (2020). *Is Europe living within the limits of our planet? An assessment of Europe's environmental footprints in relation to planetary boundaries*. Luxembourg, Federal Office of the Environment/European Environmental Agency, 61p. p.
- Eglin T., Martin É., Martin S. *et al.*, (2016). "CLIMAGRI: A computer tool and participatory approach to design mitigation strategies of air pollutant and GHG emissions due to agriculture at a territorial level". *Pollution Atmosphérique*, 203-207.
- Einarsson R., Sanz-Cobena A., Aguilera E. *et al.*, (2021). "Crop production and nitrogen use in European cropland and grassland 1961–2019". *Scientific Data*, 8 (1), 288.
- Faucon M.-P., Houben D., Reynold J.-P., Mercadal-Dulaurent A.-M., Armand R., & Lambers H., (2015). "Chapter Two—Advances and Perspectives to Improve the Phosphorus Availability in Cropping Systems for Agroecological Phosphorus Management". In D. L. Sparks (Éd.), *Advances in Agronomy* (Vol. 134, p. 51-79). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.003>
- Frehner A., Muller A., Schader C. *et al.*, (2020). "Methodological choices drive differences in environmentally-friendly dietary solutions". *Global Food Security*, 24, 100333.
- Garibaldi L.A., Oddi F.J., Miguez F.E. *et al.*, (2020). "Working landscapes need at least 20% native habitat". *Conservation Letters*, e12773, 10p.
- Gattinger A., Muller A., Haeni M. *et al.*, (2012). "Enhanced top soil carbon stocks under organic farming". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (44), 18226-18231.
- Gliessman S.R., (2007). *Agroecology: the Ecology of Sustainable Food Systems*. New York, Taylor & Francis
- Halada L., Evans D., Romão C. *et al.*, (2011). "Which habitats of European importance depend on agricultural practices?". *Biodiversity and Conservation*, 20 (11), 2365-2378.
- Herrero M., Havlik P., Valin H. *et al.*, (2013). "Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (52), 20888-20893.
- Huyghe C., De Vlieghe A., van Gils B., & Peeters A., (2014). *Grasslands and Herbivore Production in Europe and Effects of Common Policies*. éditions Quae.
- Jeffrey D., (1988). "Mineral nutrients and the soil environment". In: M.B. Jones & A. Lazenby (Eds.), *The Grass Crop*. London, New-York, Springer, pp. 179-204.
- Jeuffroy M.-H., Biarnes V., Cohan J.-P. *et al.*, (2015). "Performances agronomiques et gestion des légumineuses dans les systèmes de productions végétales". In: A. Schneider & C. Huyghe (Eds.), *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*. Versailles, Quae, pp. 139-224.
- Karlsson J.O., Carlsson G., Lindberg M. *et al.*, (2018). "Designing a future food vision for the Nordics through a participatory modeling approach". *Agronomy for Sustainable Development*, 38 (6), 59.
- Karlsson J.O. & Rööös E., (2019). "Resource-efficient use of land and animals—Environmental impacts of food systems based on organic cropping and avoided food-feed competition". *Land Use Policy*, 85, 63-72.
- Kayser M., & Isselstein J., (2005). "Potassium cycling and losses in grassland systems: A review". *Grass and Forage Science*, 60, 213-224.
- Kizeková M., Hopkins A., Kanianska R. *et al.*, (2018). "Changes in the area of permanent grassland and its implications for the provision of bioenergy: Slovakia as a case study". *Grass and Forage Science*, 73 (1), 218-232.
- Lemaire G., Gastal F., Franzluebbers A., & Chabbi A., (2015). "Grassland–Cropping Rotations: An Avenue for Agricultural Diversification to Reconcile High Production with Environmental Quality". *Environmental Management*, 56(5), 1065-1077.
- Lin B.B., (2011). "Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change". *BioScience*, 61 (3), 183-193.
- Loiseau P., Louault F., Le Roux X. *et al.*, (2005). "Does extensification of rich grasslands alter the C and N cycles, directly or via species composition?". *Basic and Applied Ecology*, 6 (3), 275-287.
- Lóránt A. & Allen B., (2019). "Net-zero agriculture in 2050: how to get there?". Brussels, Report by the Institute for European Environmental Policy, 41 p.
- Lynch J., Cain M., Frame D. *et al.*, (2021). "Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors". *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4.
- Mäder P., Edenhofer S., Boller T. *et al.*, (2000). "Arbuscular mycorrhizae in a long-term field trial comparing low-input (organic, biological) and high-input (conventional) farming systems in a crop rotation". *Biology and Fertility of Soils*, 31 (2), 150-156.
- Martin G., Moraine M., Ryschawy J. *et al.*, (2016). "Crop–livestock integration beyond the farm level: a review". *Agronomy for Sustainable Development*, 36 (3), 53.
- Moore F.C. & Lobell D.B., (2015). "The fingerprint of climate trends on European crop yields". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (9), 2670.
- Mooshammer M., Wanek W., Zechmeister-Boltenstern S., & Richter A., (2014). "Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: Mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources". *Frontiers in Microbiology*, 5.
- Mora O., Le Mouél C., de Lattre-Gasquet M. *et al.*, (2020). "Exploring the future of land use and food security: A new set of global scenarios". *PLOS ONE*, 15 (7), e0235597.
- Mottet A., de Haan C., Falcucci A. *et al.*, (2017). "Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate". *Global Food Security*, 14, 1-8.
- Muneret L., Mitchell M., Seufert V. *et al.*, (2018). "Evidence that organic farming promotes pest control". *Nature Sustainability*, 1 (7), 361.
- Pärtel M., Bruun H.H. & Sammul M., (2005). "Biodiversity in temperate European grasslands: origin and conservation". *Grassland Science in Europe*, 10, 1-14.
- Peeters A., (2009). "Importance, evolution, environmental impact and future challenges of grasslands and grassland-based systems in Europe". *Grassland Science*, 55 (3), 113-125.
- Pörtner H.-O., Scholes R., Agard J. *et al.*, (2021). *IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change*. Bonn, IPBES & IPCC, 28 p.
- Poux X. & Aubert P.-M., (2018). *Ten Years for Agroecology in Europe: a multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise*. Paris, Iddri –

- <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Etude/201809-ST0918EN-tyfa.pdf>, 73 p.
- Ray D.K., Ramankutty N., Mueller N.D. *et al.*, (2012). "Recent patterns of crop yield growth and stagnation". *Nature Communications*, 3 (1), 1293.
- Roper M. & Gupta V., (2016). "Enhancing non-symbiotic N fixation in agriculture". *The Open Agriculture Journal*, 10 (1).
- Ryschawy J., Martin G., Moraine M. *et al.*, (2017). "Designing crop–livestock integration at different levels: Toward new agroecological models?". *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108 (1), 5-20.
- Schiavo M., Le Mouel C., Poux X. *et al.*, (2021). *An agroecological Europe by 2050: What impact on land use, trade and global food security?* Paris, Iddri & INRAe, 54 p.
- Schils R., Olesen J.E., Kersebaum K.-C. *et al.*, (2018). "Cereal yield gaps across Europe". *European Journal of Agronomy*, 101, 109-120.
- Schils R.L.M., Bufe C., Rhymer C.M. *et al.*, (2022). "Permanent grasslands in Europe: Land use change and intensification decrease their multifunctionality". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 330, 107891.
- Searchinger T.D., Zions J., Wiersenus S. *et al.*, (2021). *A Pathway to Carbon Neutral Agriculture in Denmark*. Washington, World Resources Institute, 166 p.
- Simoncini R., Ring I., Sandström C. *et al.*, (2019). "Constraints and opportunities for mainstreaming biodiversity and ecosystem services in the EU's Common Agricultural Policy: Insights from the IPBES assessment for Europe and Central Asia". *Land use policy*, 88, 104099.
- Smit H.J., Metzger M.J. & Ewert F., (2008). "Spatial distribution of grassland productivity and land use in Europe". *Agricultural systems*, 98 (3), 208-219.
- Solagro, Couturier C., Charru M. *et al.*, (2016). *Le scénario Afterres 2050 version 2016*. Toulouse, Solagro, 93 p.
- Springmann M., Clark M., Mason-D'Croz D. *et al.*, (2018). "Options for keeping the food system within environmental limits". *Nature*, 562 (7728), 519-525.
- Steinfeld H., Gerber P., Wassenaar T. *et al.*, (2006). *Livestock's long shadow – environmental issues and options*. Rome, Italy, FAO.
- Van Kernebeek H.R., Oosting S.J., Van Ittersum M.K. *et al.*, (2016). "Saving land to feed a growing population: consequences for consumption of crop and livestock products". *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (5), 677-687.
- van Selm B., Frehner A., de Boer I.J.M. *et al.*, (2022). "Circularity in animal production requires a change in the EAT-Lancet diet in Europe". *Nature Food*, 3 (1), 66-73.
- Van Zanten H., Meerburg B., Bikker P. *et al.*, (2016). "Opinion paper: The role of livestock in a sustainable diet: a land-use perspective". *Animal*, 10 (4), 547-549.
- Van Zanten H.H., Herrero M., Van Hal O. *et al.*, (2018). "Defining a land boundary for sustainable livestock consumption". *Global change biology*, 24 (9), 4185-4194.
- Veen P., Jefferson R., De Smidt J. *et al.*, (Eds.), (2009). *Grasslands in Europe: Of high nature value*, KNNV Uitgeverij.
- Wezel A., Bellon S., Doré T. *et al.*, (2009). "Agroecology as a science, a movement and a practice. A review". *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 503-515.
- Wiesmeier M., Hübner R. & Kögel-Knabner I., (2015). "Stagnating crop yields: An overlooked risk for the carbon balance of agricultural soils?". *Science of The Total Environment*, 536, 1045-1051.
- Wilkinson J., (2011). "Re-defining efficiency of feed use by livestock". *Animal*, 5 (7), 1014-1022.
- Willett W., Rockström J., Loken B. *et al.*, (2019). "Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems". *The Lancet*.