

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

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

www.afpf-asso.org

La prairie dans tous ses états :

2. Evaluer la production de fourrages et la fourniture de services écosystémiques

M. Duru¹, J.-P. Theau¹, O. Therond², P. Cruz¹

Les prairies présentent une grande diversité de végétations du fait de conditions de sol, de climat et de modes de gestion variés. Disposer d'une méthode simple pour les classer à partir de leur composition pour les services qu'elles fournissent est toujours d'actualité.

RÉSUMÉ

L'identification d'un nombre limité de types fonctionnels de plantes permet de classer les prairies (semi-)naturelles et temporaires pour la production de fourrages et leurs services écosystémiques. Ces types sont définis à partir des stratégies des espèces pour leur vitesse de croissance (rapide ou lente) et la temporalité de la production (centrée sur le printemps ou plus étalée). L'analyse de la littérature montre que la production de fourrages (niveau et temporalité de la production) et les potentiels de séquestration du carbone et de pollinisation dépendent bien de la composition fonctionnelle de la végétation. Des indices, calculés à partir d'un relevé botanique simplifié, sont proposés pour caractériser cette composition.

SUMMARY

The glorious diversity of grasslands: 2. Evaluating forage production and the availability of ecosystem services

Natural, semi-natural, and temporary grasslands harbour tremendous plant diversity. In this study, we identified various functional categories of plants to better characterise their levels of forage production and ecosystem services. The categories were defined based on species' growth rates (fast or slow) and timing (growth concentrated in the spring or more spread out over the year). A review of the literature showed that the functional composition of plant communities influences forage production (level and timing), carbon sequestration, and pollination. We developed indices that can be used to characterise functional composition; they can be calculated using simple plant survey data.

1. Méthodes de caractérisation de la végétation prairiale

Caractériser la végétation prairiale pour les services qu'elle peut rendre à l'agriculture et à la société constitue toujours un enjeu majeur dans un contexte de changement global (réchauffement climatique, perte de biodiversité, attentes des consommateurs quant à l'élevage et aux produits animaux...). Le relevé de végétation, ou relevé floristique, a été utilisé jusqu'à la fin des années 90 pour calculer une valeur pastorale sur la base d'une note de valeur attribuée aux différentes espèces. Il a été montré que cette valeur était assez bien corrélée à un chargement en un

lieu donné (DAGET et POISSONNET, 1971). Ce relevé permet aussi de préciser les conditions stationnelles des prairies, à partir des indices (indices d'Ellenberg) renseignant sur les propriétés du sol (humidité et acidité), les caractéristiques du climat (continentalité et température), l'intensification (indice de fertilité azotée) et les modes d'exploitation (lumière, résistance au piétinement de l'animal et aux coupes fréquentes). Le calcul de ces indices et de la valeur pastorale sont par exemple implémentés dans la base de données Florasys¹ pour une **interprétation agroécologique du relevé floristique**. Une autre approche développée à la même époque s'attachait à caractériser la **valeur d'usage**

1 : <http://eflorasys.univ-lorraine.fr/>

AUTEURS

1 : UMR 1248 AGIR, INRA, Université Toulouse, INPT, F-31326 Castanet-Tolosan ; michel.duru@inra.fr

2 : UMR 1132 - LAE, INRA, 28, rue de Herrlisheim, F-68000 Colmar

MOTS CLÉS : Agroécologie, composition fonctionnelle, dicotylédone, fourrage, intensification, légumineuse, méthode d'estimation, paysage, prairie, santé, services écosystémiques.

KEY-WORDS : Agroecology, dicotyledon, ecosystem services, estimation method, forage, functional composition, grassland, health, intensification, landscape, legume.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Duru M., Theau J.P., Therond O., Cruz P. (2019) : "La prairie dans tous ses états : 2. Evaluer la production de fourrages et la fourniture de services écosystémiques", *Fourrages*, 240, 295-304



d'une prairie (production, précocité...) à partir d'une description plus fonctionnelle et physiologique de la végétation des prairies, basée sur la morphologie des espèces dominantes : hauteur des plantes, structure en touffes ou taches (JEANNIN *et al.*, 1991). Depuis 2012, dans le cadre du concours national « Prairies fleuries »², une méthode d'observation rapide de parcelles (plantes indicatrices, structure du couvert, paysage environnant...) permet d'estimer leurs **fonctionnalités agricoles et écologiques** ainsi que le renouvellement de la diversité végétale. Cette méthode permet aux éleveurs volontaires, qui répondent à une enquête lors des visites, d'évaluer les propriétés agricoles et écologiques de l'une de leurs prairies (productivité, valeur alimentaire, souplesse et temporalité, contribution à la biodiversité, valeur apicole) et la cohérence des usages agricoles pour valoriser et renouveler ces propriétés. **Cette méthode permet de communiquer entre acteurs des territoires sur l'intérêt du maintien des prairies** (semi-)naturelles et sur l'importance de l'élevage pour leur préservation (fauche, pâturage), **ainsi que sur le lien entre biodiversité et qualité des produits** (laitiers, fromagers, apicoles...). Au-delà de l'intérêt personnel des éleveurs participants, ce concours peut contribuer à la traduction des pratiques en termes de plus-value pour la promotion et la commercialisation des produits animaux.

Ces approches apportent des informations d'intérêt pour caractériser les prairies (semi-)naturelles des points de vue agronomique et écologique à l'échelle de la parcelle (MICHAUD *et al.*, 2012). Néanmoins, c'est à l'échelle du système fourrager que se décident les logiques d'utilisation des parcelles (DURU *et al.*, 2012), d'où la **nécessité de rendre possible un diagnostic sur un ensemble de prairies** représentatives de leur diversité³. Cet objectif nécessite aussi de caractériser les prairies temporaires (c.a.d. prairies semées de 1 à 5 ans, AGRESTE) avec une même méthode que les prairies (semi-)naturelles dans la mesure où les deux types cohabitent souvent au sein d'un élevage ou d'une petite région. Pour évaluer d'une part la nature et le degré

de complémentarité fonctionnelle au sein d'une parcelle pour l'acquisition des ressources et d'autre part le degré de complémentarité temporelle entre la végétation des différentes parcelles d'un système fourrager, il est aussi nécessaire de disposer d'une méthode de caractérisation des prairies qui mobilise au mieux les connaissances concernant les complémentarités entre espèces (HUSSE *et al.*, 2016).

Dans cette perspective, plusieurs chercheurs soulignent la nécessité de construire des indicateurs suffisamment simples afin d'être i) pertinents par rapport aux besoins des utilisateurs, ii) légitimes pour des utilisateurs ayant des objectifs différents et iii) fondés scientifiquement (CASH *et al.*, 2003),

La caractérisation de la composition fonctionnelle des écosystèmes est reconnue comme une approche prometteuse pour analyser les effets des modes de gestion sur les services écosystémiques qu'ils fournissent (WOOD *et al.*, 2015). L'enjeu est de concevoir une méthode permettant de conduire un diagnostic sur les niveaux potentiels de biens (la production de fourrages) et de services, pour orienter les modes de gestion permettant de les développer. **La composition fonctionnelle d'une prairie** (établie sur la base de groupes d'espèces ayant des fonctions similaires et partageant des caractéristiques biologiques communes) est reconnue comme **pertinente pour classer rapidement les prairies quant à leur valeur d'usage agricole** (CRUZ *et al.*, 2002) **et certains services environnementaux** (LAMARQUE, 2012). Une des approches de l'écologie fonctionnelle est de regrouper les espèces en fonction de leur similitude de réponse aux gradients écologiques (caractéristiques du milieu et des pratiques) et d'effet sur les propriétés des agroécosystèmes qui vont déterminer les services rendus (LAVOREL et GARNIER, 2002). Notre objectif est d'étendre cette approche, surtout utilisée pour caractériser les prairies (semi-)naturelles à tous types de prairies permanentes ou temporaires (composées de mélanges d'espèces) pour renseigner à la fois la production fourragère et ses composantes (temporalité de production...) et les services écosystémiques qui dépendent le plus de la composition fonctionnelle de la prairie (figure 1, d'après l'analyse de DURU et THEROND, 2018).

2 : http://www.concours-agricole.com/prairies/le_jugement_des_parcelles.html

3 : le concours Prairies fleuries exclut cette possibilité car l'évaluation est fondée sur des observations et avis d'experts pour un échantillon de prairies choisies par les éleveurs. le plus souvent des prairies déjà riches en fleurs (NETTIER *et al.*, 2011)

Dans une première partie, nous résumons les principes écologiques mobilisés pour caractériser la composition fonctionnelle de la végétation. Ensuite, nous faisons une revue de la littérature pour analyser les relations entre composition fonctionnelle, production de fourrages et services écosystémiques pour ceux qui dépendent le plus de la composition de la végétation. En dernière partie, nous définissons des indicateurs pour décrire la composition fonctionnelle de la végétation pouvant être mobilisés pour classer les prairies dans un territoire donné pour la production de fourrages et les services écosystémiques.

2. Caractériser la composition et la diversité fonctionnelles des prairies

La caractérisation de la composition fonctionnelle d'une prairie consiste à définir des groupes d'espèces qui partagent des caractères communs appelés traits fonctionnels. Ces traits sont des caractéristiques biologiques qui influencent la survie des individus et qui déterminent i) la réponse des plantes aux facteurs environnementaux et à la gestion (traits de réponse) et ii) des effets sur le fonctionnement de l'écosystème prairial (traits d'effet, figure 2 ; LAVOREL et GARNIER, 2002). Le plus souvent les espèces se situent selon un gradient continu pour la plupart des traits fonctionnels (PONTES *et al.*, 2007).

De nombreuses études concluent que, hormis les situations correspondant aux milieux très secs ou très humides, la disponibilité des ressources du sol en eau et en nutriments ainsi que la fréquence et l'intensité de la gestion sont les deux facteurs principaux qui contrôlent directement ou indirectement la composition fonctionnelle de la végétation des prairies semi-naturelles. **Deux types de stratégies sont couramment identifiés.** L'un concerne

l'acquisition et l'utilisation des ressources pour lequel on distingue les espèces à stratégie d'acquisition et de conservation ayant des croissances respectivement rapide et lente. Ces stratégies se différencient par des traits foliaires différents : feuilles minces à courte durée de vie vs feuilles plus épaisses avec une durée de vie plus longue (WILSON *et al.*, 1999). Le deuxième type de stratégie porte sur **la temporalité de croissance des plantes et leur hauteur**. Il oppose des espèces à phénologie précoce et tardive (SUN et FRELICH, 2011).

La disponibilité des ressources du sol, le climat et les perturbations (pâturage, coupe) peuvent contrôler le fonctionnement de l'écosystème directement (ex. : modification des flux de nutriments) ou indirectement par des changements dans la composition des groupes fonctionnels d'effets (figure 2, LAVOREL *et al.*, 2010). La composition fonctionnelle de la végétation des prairies (semi-)naturelles est fortement déterminée par les facteurs environnementaux et les pratiques. Pour les prairies temporaires, en particulier celles de courte durée, les traits de réponse et d'effet sont d'abord déterminés par les espèces et les cultivars semés et ensuite par la plasticité biologique des plantes en réponse aux pratiques de gestion et aux facteurs abiotiques de l'environnement. Les espèces composant la prairie peuvent avoir un impact sur la biodiversité des sols, avec des effets possibles sur le fonctionnement de la communauté (CROTTY *et al.*, 2015), qu'il s'agisse de la prairie ou des cultures en rotation avec les prairies. Ces effets peuvent passer par des changements dans l'activité des bactéries ou des champignons (mycorhizes) qui vont affecter le cycle des nutriments (LEGAY *et al.*, 2016).

Les prairies (semi-)naturelles et temporaires sont constituées d'une diversité d'espèces plus ou moins importante pour lesquelles au moins deux types principaux de complémentarité existent (LOREAU et de MAZANCOURT,

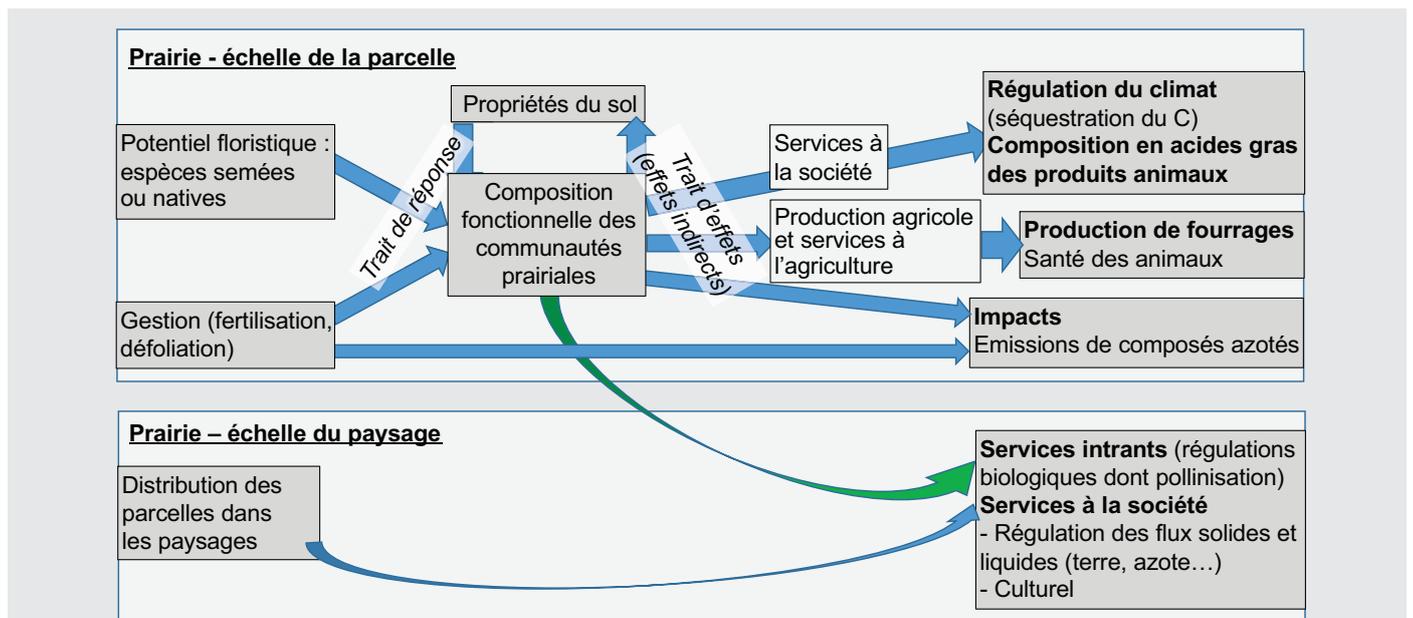


FIGURE 2 : Représentation des effets directs et indirects (via la composition fonctionnelle) de la gestion des prairies et de leur distribution dans les paysages sur les services qu'elles fournissent.

FIGURE 2 : Illustration of the direct effects and indirect effects (via functional composition) of grassland management and the relationships among the services that grasslands provide within landscapes.

2013) ; ils correspondent peu ou prou aux deux types de stratégies de croissance décrites ci-dessus. La complémentarité fonctionnelle des espèces permet le partage des ressources (nutriments, lumière, eau) à court terme du fait de complémentarités morphologiques (système racinaire ou aérien occupant des volumes différents) ou physiologiques (ex. : processus biochimiques d'acquisition de nutriments). La complémentarité temporelle correspond à l'utilisation de la même ressource par différentes espèces à différents moments, ce qui est possible surtout lorsque les espèces ont des profils de croissance asynchrones (HUSSE *et al.*, 2016). Les prairies temporaires basées sur des mélanges d'espèces devraient viser à combiner les espèces et les variétés avec des hauteurs et des phénologies contrastées, afin d'accroître leurs complémentarités fonctionnelles et temporelles (HUYGHE *et al.*, 2012). Ces combinaisons sont possibles pour les mélanges de graminées et de légumineuses, ou bien encore avec des dicotylédones comme la chicorée. Dans les prairies améliorées, **la gestion devrait viser à développer ou à maintenir de multiples groupes fonctionnels d'espèces afin d'accroître la complémentarité temporelle.**

Les facteurs abiotiques peuvent avoir des effets directs sur les propriétés du sol (par exemple la teneur en eau, la qualité des matières organiques) et, par conséquent, la fourniture de services écosystémiques comme la fourniture en azote assimilable. Ces effets peuvent être aussi indirects (figure 2) lorsque la composition de la végétation, au travers des traits d'effets, impacte la fertilité du sol ou la séquestration du carbone. Ainsi, une analyse de 14 services écosystémiques de 150 prairies semi-naturelles en Allemagne a montré que les effets indirects de l'utilisation des terres, c'est-à-dire ceux induits par des changements dans la composition fonctionnelle, étaient aussi importants que les effets directs, par exemple sur la production de fourrages (ALLAN *et al.*, 2015).

3. Services écosystémiques et impacts environnementaux

■ Production de fourrages et fourniture de services écosystémiques

• Composition fonctionnelle de la prairie et production fourragère : productivité, stabilité, flexibilité, temporalité et qualité

La vitesse de croissance de l'herbe dépend principalement de la disponibilité en azote et de la stratégie de croissance des plantes dominantes, alors que la temporalité de la production au cours de l'année dépend du degré d'asynchronie entre les types fonctionnels. Ainsi, **les dicotylédones** (par exemple, la chicorée, le plantain) **peuvent augmenter la production des prairies en allongeant la saison de croissance** du fait d'une phénologie plus tardive (ou de différences de profondeur d'enracinement pour la croissance estivale) par rapport à celle des graminées, notamment de type A (DHAMALA *et al.*, 2014).

Pour les prairies (semi-)naturelles, des études ont montré que le pourcentage de types fonctionnels de plantes ayant une stratégie de croissance rapide est un bon indicateur de la production fourragère d'une parcelle, voire du chargement, pour l'ensemble des parcelles ayant un même mode de gestion (fauche, pâturage ; DURU *et al.*, 2013). Il a également été montré que les prairies à forte diversité fonctionnelle, recevant des quantités modérées d'engrais azotés, produisent plus de biomasse que celles ayant une diversité fonctionnelle moindre et recevant la même fertilisation (DURU *et al.*, 2015), vraisemblablement parce qu'**une asymétrie fonctionnelle entre espèces d'une même communauté permet de capter plusieurs formes d'azote** (MAIRE *et al.*, 2012). La digestibilité et la teneur en N de l'herbe peuvent être prédites par la composition fonctionnelle des prairies : celles composées d'espèces ayant une stratégie de croissance rapide ont une qualité supérieure au stade feuillu (DURU *et al.*, 2008). Les prairies recevant des quantités d'azote plus élevées sont dominées par des types fonctionnels de plantes ayant une stratégie de croissance rapide (DURU *et al.*, 2010), ce qui conduit à un pic de croissance marqué du fait d'une faible asynchronie entre types fonctionnels de plantes (ZHANG *et al.*, 2016). A l'opposé, le rendement en matière sèche et la qualité de l'herbe des prairies diversifiées du point de vue fonctionnel varient peu en fonction de la date de récolte autour du pic de croissance de l'herbe. De cette façon, ce type de végétation permet une plus grande souplesse pour les dates de pâturage ou de fauche. Le profil de croissance de l'herbe au cours des saisons dépend beaucoup du type de graminées (MICHAUD *et al.*, 2012) ; la croissance est soutenue plus longtemps au printemps pour les espèces ayant une floraison tardive et aux autres saisons pour les espèces ayant une durée de vie des feuilles longue ; les deux caractéristiques sont partiellement positivement corrélées (DURU *et al.*, 2014). Les dicotylédones renforcent souvent cet effet en raison de leur complémentarité temporelle (VAN RUIJVEN et BERENDSE, 2003). De nombreux chercheurs ont constaté que, indépendamment du type de prairie, **la production des prairies diversifiées reste plus stable au fil des années en raison de leur plus grande diversité fonctionnelle** (par exemple SANDERSON, 2010). Les prairies (semi-)naturelles extensives sont souvent dominées par des plantes à croissance lente et à reproduction tardive qui sont adaptées aux milieux pauvres (MORECROFT *et al.*, 2015).

• Stock et séquestration de carbone

Dans les zones tempérées, les prairies permanentes et temporaires ont respectivement un **stock moyen** variant de 52 à 85 t/ha de carbone dans l'horizon 0-30 cm (PELLERIN *et al.*, 2019). Pour les prairies temporaires, les légumineuses permettent d'atteindre des stocks de carbone organique dans le sol plus élevés que dans les prairies de graminées du fait d'une fourniture d'azote supérieure, notamment dans les milieux sans apports d'engrais azotés (LÜSCHER *et al.*, 2014). Nous avons par ailleurs montré que, pour des prairies permanentes, le stock de C dans le sol est plus élevé lorsque la diversité fonctionnelle est élevée (DURU *et al.*, 2014, 2015).

Le **taux de stockage annuel** dépend de l'âge de la prairie, des propriétés du sol et des modes de gestion. Pour les prairies temporaires, la séquestration de carbone, élevée les premières années après implantation des prairies, diminue beaucoup au-delà de 30 ans, puis est très faible après 50 ans (SMITH, 2014). Ainsi, une augmentation de la durée des prairies temporaires (+ 1-2 ans) augmenterait la séquestration en C d'environ 30 kg C/ha/an (PELLERIN *et al.*, 2019). Pour les prairies permanentes, une synthèse des données de la littérature aboutit à un stockage additionnel moyen de 50 kg C/ha/an, alors que des simulations estiment ces valeurs à 189 et 396 kg C/ha/an respectivement pour des prairies productives et des landes et estives d'autre part.

• Fourniture N et régulation des flux d'azote

Les légumineuses prairiales contribueraient à faire entrer environ 135 000 t d'azote dans les sols des prairies semi-naturelles en France, 255 000 t dans les prairies temporaires ou permanentes (semées de longue durée) et 80 000 t d'azote *via* les prairies de légumineuses pures (SCHNEIDER et HUYGHE, 2015). Elles rendent un service de fourniture d'azote aux sols et aux autres plantes prairiales, en évitant les émissions de N₂O et l'utilisation de ressources non renouvelables associées à la fabrication et aux épandages d'engrais chimiques. Ce service de fourniture d'azote s'accompagne également d'une amélioration de l'autonomie protéique des exploitations grâce aux teneurs en N élevées des légumineuses et à leur meilleure persistance dans le temps. Néanmoins, en cas de flux N intrants importants, quelles que soient les prairies, les risques d'émissions de flux polluants sont élevés car de 65 à 95% de l'azote ingéré a lieu au pâturage (VERTÈS *et al.*, 2019). Une synthèse de nombreuses expériences montre que **les pertes de N (nitrate) augmentent avec la quantité de N fournie**, quelle que soit son origine (inorganique, symbiotique, urine ou fumier), d'abord lentement, puis fortement pour des quantités d'azote supérieures à 200 kg/ha lorsque la prairie est pâturée et 400 kg/ha lorsqu'elle est fauchée (VERTÈS *et al.*, 2009). La couverture continue des sols sous prairies permet néanmoins de limiter les risques par rapport à des sols nus (ou sous céréales) qui ne peuvent intercepter la minéralisation hivernale et les risques de pertes restent très modérés pour des niveaux d'entrée d'azote inférieurs à 150 kg N/ha/an. Les prairies à base de légumineuses peuvent réduire légèrement les pertes de nitrates et les émissions d'oxyde nitreux (N₂O ; LÜSCHER *et al.*, 2014 ; VERTÈS *et al.*, 2009) grâce à la régulation de la fixation symbiotique par l'azote du sol (VOISIN et GASTAL, 2015). Combiner des espèces différant par plusieurs caractéristiques concernant la capture des nutriments optimise l'utilisation de ceux-ci et réduit les pertes par volatilisation ou lixiviation (HUSSE *et al.*, 2017). Enfin, **le rôle régulateur des prairies dans les flux de nitrate à l'échelle des bassins-versants est largement démontré**, quel que soit le type de flore (DURAND *et al.*, 2015).

• Pollinisation, santé animale et humaine et services culturels

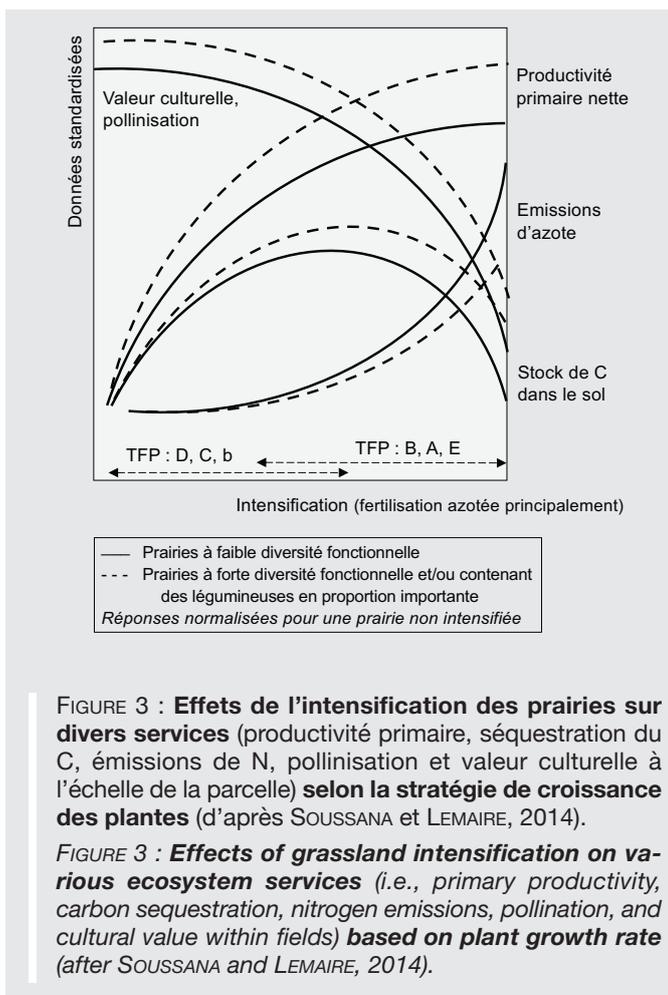
Les prairies riches en fleurs, comme beaucoup de prairies semi-naturelles, sont essentielles pour soutenir l'abondance et la diversité des pollinisateurs d'insectes dans un paysage agricole intensivement cultivé (ÖCKINGER et SMITH, 2007). Ces prairies fournissent sur le temps long de la nourriture et un habitat aux pollinisateurs. ORFORD *et al.* (2016) ont constaté que des augmentations modestes de la richesse des espèces de plantes dans les prairies, principalement des dicotylédones dont les légumineuses, sont associées à des services de pollinisation significativement améliorés et des rendements potentiellement accrus de cultures dépendantes de la pollinisation.

Certains effets spécifiques des espèces sont observés sur la santé animale et les produits animaux (POUTARAUD *et al.*, 2017). Par exemple, les espèces de légumineuses riches en tanins, en particulier le sainfoin ainsi que le plantain, permettent aux agriculteurs de réduire ou même d'éviter l'utilisation d'antihelminthiques synthétiques pour lutter contre les nématodes gastro-intestinaux des ruminants (HOSTE *et al.*, 2006). Ces espèces contribuent à contourner le développement de la résistance, mais empêchent aussi la présence de résidus de médicaments dans le fumier (PEYSSON et VULLIET, 2013) et le lait, ce qui peut avoir un impact sur la santé humaine (TSIBOUKIS *et al.*, 2013). Les prairies riches en espèces, en particulier celles contenant des dicotylédones, ont des métabolites secondaires qui peuvent influencer le métabolisme des lipides du rumen chez les vaches et affectent ainsi la qualité nutritionnelle des produits laitiers et la saveur du fromage (FARRUGGIA *et al.*, 2014). Par ailleurs, le côté esthétique des prairies est associé à la biodiversité (ALLAN *et al.*, 2015), en particulier les prairies contenant de nombreuses espèces florifères (couleurs...). Ces effets positifs contribuent aussi à la valeur patrimoniale des prairies, qui abritent de nombreuses espèces rares végétales et animales (cf. les travaux des Conservatoires botaniques nationaux).

■ Antagonismes, compromis et synergies entre services à l'échelle de la parcelle

Les interactions entre services écosystémiques (voir BENNET *et al.*, 2009, pour une revue) dans les prairies sont basées sur l'intensité de la gestion et la composition fonctionnelle des prairies, et se produisent à différents niveaux d'organisation (figure 3). L'analyse à grande échelle des études présentées dans la section précédente montre plusieurs compromis entre services, mais certaines synergies possibles existent et peuvent être promues.

Le plus souvent, l'intensification des prairies (semi-) naturelles *via* l'apport de fertilisants N (P et K) augmente la production de biomasse et entraîne des changements dans la composition fonctionnelle ainsi qu'une réduction de la diversité spécifique. Ces changements de biodiversité pour les plantes mais aussi dans le sol peuvent réduire la part de la production obtenue par la minéralisation de la matière organique (PAN *et al.*, 2014) et les services culturels (ALLAN *et al.*, 2015). Une forte intensification des prairies,



fertilisation en particulier, est généralement associée à une faible diversité fonctionnelle, à une moindre flexibilité pour leur utilisation et à une moindre stabilité dans la composition fonctionnelle de la communauté végétale (DURU *et al.*, 2010). Comme évoqué précédemment, les émissions d'azote augmentent avec la quantité de N en jeu, en particulier au-dessus d'un seuil d'azote donné qui dépend généralement du contexte, comme le type de sol et beaucoup des pratiques de gestion (fauche *vs* pâturage ; VERTÈS *et al.*, 2009, 2019). **Un compromis est nécessaire entre la production d'herbe** (croissante avec l'intensification) **et la séquestration en C**,

qui apparaît maximale pour un apport d'azote modéré (ASSMANN *et al.*, 2014 ; PELLERIN *et al.*, 2019). Cependant, **le niveau d'intensification auquel ce compromis est à réaliser dépend de la part des légumineuses dans la végétation et du niveau de diversité fonctionnelle**. Les associations de graminées et légumineuses avec 30 à 50% de légumineuses semblent être optimales pour produire de la biomasse à forte valeur nutritive avec de faibles apports d'azote exogènes, réduire les pertes d'azote, stocker du carbone et favoriser les pollinisateurs (LÜSCHER *et al.*, 2014 ; SOUSSANA *et al.*, 2004). Mais le fait que la contribution des légumineuses dans les prairies (semi-)naturelles soit en moyenne de 12% (JEUFFROY *et al.*, 2015) invite à imaginer des itinéraires techniques (sursemis) pour accroître leur proportion. Cependant, cette technique conduit à appauvrir la diversité floristique lorsqu'associée à un apport de phosphore pour faciliter l'installation des légumineuses (JAURENA *et al.*, 2016).

En résumé, un niveau élevé de services écosystémiques avec un faible niveau d'impacts tels que les émissions d'azote se produit pour une intensité de gestion intermédiaire tant pour les prairies (semi-)naturelles que pour les prairies temporaires. L'augmentation de la proportion de légumineuses dans les prairies diminue les émissions d'azote du fait d'un moindre apport de fertilisants et augmente le stock de C dans le sol. **La fauche permet de mieux contrôler les émissions d'azote** (si la fertilisation N est maîtrisée) **et le pâturage permet d'augmenter la séquestration du carbone**.

4. Propositions d'indicateurs pour relier les stratégies des plantes aux biens et services

Dans un premier temps nous avons construit des groupes fonctionnels de plantes selon leur stratégie pour l'acquisition et l'utilisation des ressources, ainsi que leur temporalité de croissance, en nous basant sur les types fonctionnels existants. Ensuite, il a été possible d'établir des indicateurs de composition fonctionnelle d'une prairie pour évaluer les services fournis.

Type Fonctionnel de Graminée (TFG)			Type Fonctionnel de Légumineuse		Stratégie de croissance : Type Fonctionnel de Plante (TFP)	
Exemples	TMS (mg/g)		Exemples	TMS (mg/g)		Note
TFG E	Ray-grass italien	210			} TFP Rapide	1
TFG A	Ray-grass anglais	230	Trèfle blanc	205		
TFG B	Dactyle	260	Trèfle violet, luzerne	240		
TFG b	Agrostis commun	270			} TFP Lent	2
TFG C	Fétuque rouge	290	Lotier	260		
TFG D	Brachypode	370				

TABEAU 1 : Classement des graminées et des principales légumineuses en Types Fonctionnels de Plante (TFP) pour l'acquisition et l'utilisation des ressources, sur la base de la teneur en matière sèche des feuilles (TMS ; DURU *et al.*, 2010 et 2014).

TABLE 1 : Classification of grasses and common legumes into plant functional types (TFP) to estimate the acquisition and utilisation of resources based on leaf dry matter content (TMS ; DURU *et al.*, 2010 et 2014).

	Date de floraison (° .jours)	Note pour :			Note de temporalité de croissance (a+b+c)
		Date de floraison (a)	Seuil de température (b)	Système racinaire (c)	
Graminées très tardives (TFG D)	2 000 ⁽¹⁾	3	1	1	5
Graminées tardives (TFG b)	1 700 ⁽¹⁾	2,5	1	1	4,5
Graminées précoces (TFG C)	1 400 ⁽¹⁾	2	1	1	4
Graminées précoces (TFG B)	1 250 ⁽¹⁾	1,5	1	1	3,5
Graminées précoces (TFG A)	850 ⁽¹⁾	1	1	1	3
Graminées très précoces (TFG E)	600 ⁽¹⁾	0,5	1	1	2,5
Légumineuses précoces avec système racinaire superficiel (par ex. trèfle blanc)	600 ⁽²⁾	0,5	2	1	3,5
Légumineuses précoces avec système racinaire intermédiaire (par ex. trèfle violet)	600 ⁽²⁾	0,5	2	1,5	4
Légumineuses tardives avec système racinaire profond (par ex. luzerne)	1 100 ⁽²⁾	1,5	2	2	5,5
Dicotylédones précoces	600 ⁽²⁾	0,5	1	1	2,5

1 : DURU *et al.*, (2013) ; 2 : CRUZ, comm. Pers. ; expertise des auteurs pour le système racinaire

TABLE 2 : Classement des types fonctionnels de plantes selon leur temporalité de croissance à partir de 3 critères.

TABLE 2 : Classification of plant functional types based on growth timing using 3 criteria.

■ Caractérisation des stratégies de croissance des plantes

Le classement des graminées en types fonctionnels (TFG A, B, b, C et D : CRUZ *et al.*, 2002 ; DURU *et al.*, 2010 et 2014), sur la base de la teneur en matière sèche des feuilles (CRUZ *et al.*, 2010), a été ensuite étendu à des graminées annuelles (type E : FARRUGGIA *et al.*, 2006) sur la base de traits pour les deux types de stratégie de croissance (DURU *et al.*, 2014) puis aux légumineuses (tableau 1).

En Europe, les prairies temporaires multi-spécifiques typiques sont des associations de *Lolium perenne* L. (TFG A) avec *Trifolium repens* L., ou de *Dactylis glomerata* L. ou *Festuca arundinacea* L. (TFG B) avec *Medicago sativa* L. ou *Trifolium pratense* L., ou des mélanges plus complexes tels que le mélange suisse typique de *Festuca rubra* L. (TFG C), *M. sativa* L. et *Lotus corniculatus* L. Pour faciliter l'établissement de relations entre la composition fonctionnelle et les services fournis, la composition fonctionnelle des prairies peut être caractérisée de manière simplifiée en se limitant à la proportion des types ayant la stratégie de capture la plus élevée.

Nous avons également classé les espèces de plantes selon leur temporalité de croissance, en considérant :

- leurs caractéristiques phénologiques (précoce *vs* tardive) ;
- les seuils thermiques pour la croissance : les légumineuses ont des seuils de température plus élevés que les graminées (5-25°C *vs* 0-20°C ; DURU *et al.*, 2010), ce qui décale leur croissance ;
- le système racinaire car certaines légumineuses comme la luzerne (mais aussi certaines dicotylédones) développent un système racinaire profond qui les rend moins sensibles au déficit hydrique que les graminées.

Par conséquent, la temporalité de croissance est composite puisqu'elle inclut des caractéristiques phénologiques (date de floraison), le groupe fonctionnel de plantes (graminées *vs* légumineuses) et l'architecture du système racinaire (superficiel *vs* profond) (tableau 2).

■ Indicateurs de composition fonctionnelle pour caractériser les biens et services fournis par les prairies

Sur la base des analyses faites ci-dessus et des résultats antérieurs obtenus pour les prairies (semi-)naturelles, nous proposons les indices suivants pour caractériser les deux dimensions des stratégies de croissance (vitesse et temporalité) à l'échelle de la prairie :

- l'indice moyen pondéré pour la vitesse ou pour la temporalité de croissance : $\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n P_i \times N_i$

où n est le nombre de types fonctionnels de la prairie (A, B, b...), P_i la proportion du TFP_i et N la note (dernière colonne des tableaux 1 pour la stratégie de croissance et 2 pour la temporalité de croissance) ;

- l'indice de diversité fonctionnelle tant pour la vitesse que pour la temporalité de croissance : $1 - \sum_{i=1}^n P_i^2$ caractériser la diversité intra communauté entre types fonctionnels pour la stratégie et la temporalité de croissance.

En outre, deux indices complémentaires concernant les proportions de légumineuses et de dicotylédones non légumineuses permettent de tenir compte de propriétés spécifiques qui sont détaillées ci-après.

Nous donnons un exemple de calcul (tableau 3) des indices moyens pondérés et des indices de diversité pour deux prairies différant par leur composition fonctionnelle (type de graminées et de légumineuses). Dans cet exemple, les prairies diffèrent beaucoup pour les indices de vitesse de croissance (indice moyen pondéré et indice de diversité).

	Proportion des TFG (%) dans le couvert		Proportion des graminées par TFG (%) dans le couvert	
	Prairie 1	Prairie 2	Prairie 1	Prairie 2
Composition fonctionnelle du couvert végétal				
Proportion de graminées (%)	80	60	80	60
TFG E	10	0	8	0
TFG A	50	10	40	6
TFG B	30	30	24	18
TFG b	10	40	8	24
TFG C	0	10	0	6
TFG D	0	10	0	6
Vitesse de croissance				
Indice moyen pondéré	0,9	0,4		
Indice de diversité	0,64	0,73		
Temporalité de croissance				
Indice moyen pondéré			3,3	3,76
Indice de diversité			0,68	0,65

TABLEAU 3 : Exemples de calcul des indices de composition fonctionnelle.
TABLE 3 : Examples of how to calculate the plant community functional composition indices.

Les valeurs des deux indices moyens pondérés sont à interpréter par rapport à la gamme des possibles (dernière colonne des tableaux 1 et 2). Des illustrations portant sur la quasi-totalité des parcelles de 8 exploitations herbagères seront données dans l'article suivant.

Pour évaluer la production fourragère, les services et impacts, nous synthétisons dans le tableau 4 les indices de composition fonctionnelle et de gestion appropriés pour classer les prairies selon les caractéristiques des fourrages produits, les niveaux de services écosystémiques fournis et les impacts environnementaux. En outre, deux indicateurs de gestion sont proposés pour moduler le niveau des services et des impacts (l'effet de l'apport d'azote sur les émissions dépend de seuils).

Conclusion

Les prairies permanentes et temporaires fournissent des biens (la production de fourrages) et des services écosystémiques dont plusieurs dépendent de leur composition fonctionnelle. La composition fonctionnelle peut être calculée sur la base de la proportion d'un nombre limité de types fonctionnels de plantes prédéfinis, facilement caractérisables à partir d'un relevé botanique simplifié sans que la précision ne soit trop réduite.

Les types fonctionnels de plantes se distinguent pour deux types de complémentarité : l'acquisition des ressources (lumière, azote, phosphore...) et l'asynchronie de croissance, que cette dernière soit due à la phénologie, à l'architecture du système racinaire ou à la différence de réponse à la température.

Caractériser la composition fonctionnelle des prairies permet dès lors de les classer au sein d'une exploitation ou d'un petit territoire pour les caractéristiques de la production fourragère (niveau et temporalité), de même que pour plusieurs services écosystémiques (pollinisation, stockage du carbone) dont le niveau est aussi régi par les stratégies de croissance des plantes. Des indicateurs complémentaires sur des espèces clefs (légumineuses à tanins) ou sur des pratiques (fertilisation) permettent de préciser respectivement certains services et impacts. L'intérêt de la méthode sera illustré dans un prochain article.

Accepté pour publication,
le 21 novembre 2019

Indicateur	Production fourragère (biens)		Services		Impacts environnementaux
	Production	Saisonnalité	Stockage de C	Pollinisation, services culturels	Emissions de N
Indices de composition fonctionnelle					
Indice pondéré pour la vitesse de croissance			x		
Indice de diversité pour la complémentarité entre TFP	x				X
Indice pondéré pour l'asynchronie de croissance		x			
Indice de diversité pour la temporalité de croissance	x	x	x		X
Légumineuses (%)	x		x	(x)	X
Dicotylédones (%)	(x)			x	
Gestion					
N apporté			x		
Défoliation	x		(x)	(x)	X

TABLEAU 4 : Choisir les indicateurs pour évaluer les services et impacts fournis par les prairies.

TABLE 4 : Choosing indicators for evaluating grassland services and impacts.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLAN E., MANNING P., ALT F. *et al.* (2015) : "Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition", *Ecology Letters*, 18, 834-843.
- ASSMANN T.S., DE BORTOLLI M.A., ASSMANN *et al.* (2014) : "Does cattle grazing of dual-purpose wheat accelerate the rate of stubble decomposition and nutrients released?", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 37-42.
- BENNETT E.M., PETERSON G.D., GORDON L.J. (2009) : "Understanding relationships among multiple ES", *Ecology Letters*, 12, 1394-1404.
- CASH D.W., CLARK W.C., ALCOCK F., DICKSON N.M., ECKLEY N., GUSTON D.H., ... MITCHELL R.B. (2003) : "Knowledge systems for sustainable development", *Proc. national academy of sciences*, 100 (14), 8086-8091.
- CROTTY F.V., FYCHAN R., SCULLION J., SANDERSON R., MARLEY C.L. (2015) : "Assessing the impact of agricultural forage crops on soil biodiversity and abundance", *Soil Biology and Biochemistry*, 91, 119-126.
- CRUZ P., DURU M., THEROND O., THEAU J.P., DUCOURTIEUX C., JOUANY C., AL HAJ KHALED R., ANSQUER P. (2002) : "Une nouvelle approche pour caractériser la valeur d'usage des prairies naturelles et semi-naturelles", *Fourrages*, 172, 335-354.
- CRUZ P., THEAU J.P., LECLoux E. *et al.* (2010) : "Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes : une classification multitraits", *Fourrages*, 201, 11-17.
- DAGET P., POISSONNET J. (1971) : "Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. Critères d'application", *Annales agronomiques*, 22, 5-41.
- DHAMALA N.R., SØEGAARD K., ERIKSEN J. (2014) : "Competitive forbs in high-producing temporary grasslands with perennial ryegrass and red clover can increase plant diversity and herbage yield", *Grassland Science in Europe*, 20, 209-211.
- DURAND P., MOREAU P., SALMON-MONVIOU J., RUIZ L., VERTÈS F., GASCUEL-ODOUX C. (2015) : "Modeling the interplay between N cycling processes and mitigation options of nitrate pollution in farming catchments", *The Journal of Agricultural Science*, 153, 6, 959-974.
- DURU M., CRUZ P., AL HAJ KALEL R., DUCOURTIEUX C., THEAU J.P. (2008) : "Relevance of plant functional types based on leaf dry matter content for assessing digestibility of native grass species and species-rich grassland communities in spring", *Agronomy Journal*, 100, 1622-1630.
- DURU M., CRUZ P., THEAU J.P. (2010) : "A simplified method for characterising agronomic services provided by species-rich grasslands", *Crop and pasture science*, 61 (5), 420-433.
- DURU M., THEAU J.P., CRUZ P. (2012) : "Functional diversity of species-rich managed grasslands in response to fertility, defoliation and temperature", *Basic and Applied Ecology*, 13, 20-31.
- DURU M., JOUANY C., LE ROUX X., NAVAS M.L. (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, 3, 239-254.
- DURU M., THEAU J.P., MARTIN G. (2015) : "A methodological framework to facilitate analysis of ecosystem services provided by grassland-based livestock systems", *Int. Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 11 (2), 128-144.
- DURU M., THEROND D. (2018) : "La prairie dans tous ses états : 1. Une approche multiniveaux et multidomaines de ses atouts pour l'agriculture et la société", *Fourrages*, 236, 229-237.
- FARRUGGIA A., DUMONT B., JOUVEN M. *et al.* (2006) : "La diversité végétale à l'échelle de l'exploitation en fonction du chargement dans un système bovin allaitant du Massif central", *Fourrages*, 188, 477-493.
- FARRUGGIA A., POMIÈS D., COPPA M., FERLAY A., VERDIER-METZ I., LE MORVAN A., ... MARTIN B. (2014) : "Animal performances, pasture biodiversity and dairy product quality: How it works in contrasted mountain grazing systems", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 185, 231-244.
- HOSTE H., JACKSON F., ATHANASIADOU S., THAMSBORG S.M., HOSKIN S.O. (2006) : "The effects of tannin-rich plants on parasitic nematodes in ruminants", *Trends in Parasitology*, 22, 253-261.
- HUSSE S., HUGUENIN-ELIE O., BUCHMANN N., LÜSCHER A. (2016) : "Larger yields of mixtures than monocultures of cultivated grassland species match with asynchrony in shoot growth among species but not with increased light interception", *Field Crops Research*, 194, 1-11.
- HUSSE S., LÜSCHER A., BUCHMANN N., HOEKSTRA N.J., HUGUENIN-ELIE O. (2017) : "Effects of mixing forage species contrasting in vertical and temporal nutrient capture on nutrient yields and fertilizer recovery in productive grasslands", *Plant and Soil*, 420 (1-2), 505-521.
- HUYGHE C., LITRICO I., SURAULT F. (2012) : "Agronomic value and provisioning services of multi-species swards", *Grassland Science in Europe* 17, 35-46.
- JAURENA M., LEZAMA F., SALVO L., CARDOZO G., AYALA W., TERRA J., NABINGER C. (2016) : "The dilemma of improving native grasslands by overseeding legumes: Production intensification or diversity conservation", *Rangeland ecology & management*, 69 (1), 35-42.
- JEANNIN B., FLEURY P., DORIOZ J.M. (1991) : "1 - Typologie des prairies d'altitude des Alpes du Nord: méthode et réalisation", *Fourrages*, 128, 379-396.
- JEUFFROY M.H., BIARNÈS V., COHAN J.P., CORRE-HELLOU G., GASTAL F., JOUFFRET P., JUSTES E., LANDÉ N., LOUARN G., PLANTUREUX S., SCHNEIDER A., THIÉBEAU P., VALANTIN-MORISON M., VERTÈS F. (2015) : "Performances agronomiques et gestion des légumineuses dans les systèmes de productions végétales", *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, A. Schneider, C. Huyghe (coord.), éd. Quae, 104-164.
- LAMARQUE P. (2012) : *Une approche socio-écologique des services écosystémiques. Cas d'étude des prairies subalpines du Lautaret*, doctoral dissertation, Grenoble.
- LAVOREL S., GARNIER E. (2002) : "Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail", *Functional Ecology*, 16 (5), 545-556.
- LAVOREL S., GRIGULIS K., LAMARQUE P., COLACE M.P., GARDEN D., GIREL J., ... DOUZET R. (2010) : "Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ES", *Journal of Ecology*, 99, 135-147.
- LEGAY N., GRASSEIN F., BINET M.N., ARNOLDI C., PERSONENI E., PERIGON S., ... MOUHAMADOU B. (2016) : "Plant species identities and fertilization influence on arbuscular mycorrhizal fungal colonisation and soil bacterial activities", *Applied Soil Ecology*, 98, 132-139.
- LOREAU M., DE MAZANCOURT C. (2013) : "Biodiversity and ecosystem stability: A synthesis of underlying mechanisms", *Ecology Letters*, 16 (suppl.1), 106-115.
- LÜSCHER A., MUELLER-HARVEY I., SOUSSANA J.F., REES R.M., PEYRAUD J.L. (2014) : "Potential of legume-based grassland-livestock systems in Europe: a review", *Grass and Forage Science*, 69 (2), 206-228.
- MAIRE V., GROSS N., BÖRGER L., PROULX R., WIRTH C., PONTES L. DA S., ... LOUAULT F. (2012) : "Habitat filtering and niche differentiation jointly explain species relative abundance within grassland communities along fertility and disturbance gradients", *New Phytologist*, 196 (2), 497-509.
- MICHAUD A., ANDUEZA D., PICARD F., PLANTUREUX S., BAUMONT R. (2012) : "Seasonal dynamics of biomass production and herbage quality of three grasslands with contrasting functional compositions", *Grass and Forage Science*, 67 (1), 64-76.
- MORECROFT M.D., BEALEY C.E., SCOTT W.A., TAYLOR M.E. (2015) : "Interannual variability, stability and resilience in UK plant communities", *Ecological Indicators*, 68, 63-72.
- NETTIER B., DOBREMÈZ L., SÈRÈS C., PAUTHENET Y., ORSINI M., KOSMALA L., FLEURY P. (2011) : "Préservation de la biodiversité par les éleveurs : atouts et limites de la mesure agri-environnementale Prairies fleuries", *Fourrages*, 208, 283-292.
- ÖCKINGER E., SMITH H.G. (2007) : "Semi-natural grasslands as population sources for pollinating insects in agricultural landscapes", *Journal of Applied Ecology*, 44 (1), 50-59.
- ORFORD K.A., MURRAY P.J., VAUGHAN I.P., MEMMOTT J. (2016) : "Modest enhancements to conventional grassland diversity improve the provision of pollination services", *Journal of Applied Ecology*, 53, 906-915.
- PAN Y., WU J., XU Z. (2014) : "Analysis of the tradeoffs between provisioning and regulating services from the perspective of varied share of net primary production in an alpine grassland ecosystem", *Ecological Complexity*, 17 (1), 79-86.
- PELLERIN S., BAMIÈRE L. (COORD.), LAUNAY C., MARTIN R., ... RÉCHAUCHÈRE O. (2019) : *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude*, INRA (France), 114 p.

- PEYSSON W., VULLIET E. (2013) : "Determination of 136 pharmaceuticals and hormones in sewage sludge using quick, easy, cheap, effective, rugged and safe extraction followed by analysis with liquid chromatography-time-of-flight-mass spectrometry", *Journal of Chromatography A*, 1290, 46-61.
- PONTES L. DA S., SOUSSANA J.F., LOUAULT F., ANDUEZA D., CARRÈRE P. (2007) : "Leaf traits affect the above-ground productivity and quality of pasture grasses", *Functional Ecology*, 21, 844-853.
- POUTARAUD A., MICHELOT-ANTALIK A., PLANTUREUX S. (2017) : "Grasslands: a source of secondary metabolites for livestock health", *Journal of agricultural and food chemistry*, 65 (31), 6535-6553.
- SANDERSON M.A. (2010) : "Stability of production and plant species diversity in managed grasslands: A retrospective study", *Basic and Applied Ecology*, 11 (3), 216-224.
- SCHNEIDER A, HUYGHE C. (coord.) (2015) : *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, éd. Quae, 220-251.
- SMITH P. (2014) : "Do grasslands act as a perpetual sink for carbon?", *Global Change Biology*, 20 (9), 2708-2711.
- SOUSSANA J.F., LEMAIRE G. (2014) : "Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems.", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 9-17.
- SOUSSANA J.F., LOISEAU P., VUICHARD N., CESCHIA E., BALESSENT J., CHEVALLIER T., ARROUAYS D. (2004) : "Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands", *Soil Use and Management*, 20, 219-230.
- SUN S., FRELICH L.E. (2011) : "Flowering phenology and height growth pattern are associated with maximum plant height, relative growth rate and stem tissue mass density in herbaceous grassland species", *Journal of Ecology*, 99, 991-1000.
- TSIBOUKIS D., SAZAKLI E., JELASTOPULU E., LEOTSIDIS M. (2013) : "Anthelmintic residues in raw milk. Assessing intake by a children population", *Polish Journal of Veterinary Sciences*, 16 (1), 85-91.
- VAN RUIJVEN J., BERENDSE F. (2003) : "Positive effects of plant species diversity on productivity in the absence of legumes", *Ecology Letters*, 6 (3), 170-175.
- VERTÈS F., SIMON J.C., GIOVANNI C., GRIGNANI M., CORSON M.S., DURAND P., PEYRAUD J.L. (2009) : "Flux de nitrate dans les élevages bovins et qualité de l'eau : variabilité des phénomènes et diversité des conditions", *Académie d'Agriculture de France*, mai 2008, éd. Acad. Agric. - IDELE, 6-26.
- VERTÈS F., DELABY L., KLUMPP K., BLOOR J. (2019) : "C-N-P Uncoupling in Grazed Grasslands and Environmental Implications of Management Intensification", Lemaire, G., Carvalho, P.C.D.F., Kronberg, S., Recous, S. (eds.), *Agroecosystem Diversity: Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality*, Elsevier, Academic Press, 15-34.
- VOISIN A., GASTAL F. (2015) : "Nutrition azotée et fonctionnement agrophysiologique spécifique des légumineuses", *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*, A. Schneider, C. Huyghe (coord.), éd. Quae, 79-138.
- WILSON P.J., THOMPSON K., HODGSON J.G. (1999) : "Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies", *New Phytologist*, 143, 155-162.
- WOOD S.A., KARP D.S., DE CLERCK F., KREMEN C., NAEEM S., PALM C.A. (2015) : "Functional traits in agriculture: agrobiodiversity and ecosystem services", *Trends in Ecology & Evolution*, 1-9.
- ZHANG Y., LOREAU M., LÜ X., HE N., ZHANG G., HAN X. (2016) : "Nitrogen enrichment weakens ecosystem stability through decreased species asynchrony and population stability in a temperate grassland", *Global change biology*, 22 (4), 1445-1455.