



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



AFPF - Maison Nationale des Eleveurs - 149 rue de Bercy - 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)1.40.04.52.00 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

La prairie dans tous ses états : 3. Services fournis de la ferme au paysage en Aveyron

M. Duru¹, A. Meillet², J. P. Theau¹, T. Poméon², O. Therond³

Les services fournis par les prairies permanentes et temporaires peuvent être évalués indirectement par leur composition fonctionnelle et leur place dans les rotations et les paysages. Nous présentons ici le type de diagnostic qui peut être fait à partir de relevés botaniques simplifiés de prairies dans des élevages et d'une cartographie de l'utilisation du sol au grain des « îlots PAC » pour le département de l'Aveyron.

RESUME

Les articles précédents (Duru et Therond, 2018 ; Duru et al., 2019) posent les bases conceptuelles et méthodologiques permettant une analyse de la gamme des biens et services fournis par les prairies à l'agriculture et à la société. Cet article présente une illustration de l'opérationnalisation de l'approche proposée aux niveaux de la parcelle et du paysage.

Des relevés botaniques simplifiés ont permis de caractériser les prairies (permanentes, temporaires de moins ou plus de 5 ans ; n=208) de six exploitations d'élevage bovin du nord et de l'ouest du département de l'Aveyron en termes de temporalité de croissance (précoce vs tardive, étalée vs saisonnée) et le niveau de services qu'elles permettent de fournir. On montre que ce sont les prairies temporaires de moins de 5 ans, comprenant un pourcentage de légumineuses en moyenne plus élevé, qui présentent les temporalités de croissance les plus extrêmes (précoce ou tardive, et étalement important).

L'évaluation de quelques services (pollinisation, régulation des adventices, stabilisation des sols et séquestration du carbone) fournis par les prairies à l'échelle du département de l'Aveyron a été faite en mobilisant des algorithmes établissant le lien entre distribution spatiale des différents types de prairies et services pour interpréter la carte d'utilisation du sol au grain des îlots PAC. Cette cartographie montre un niveau de services moyen à élevé, mais des différences en fonction de la part des prairies de moins de 5 ans.

D'une manière générale, le département de l'Aveyron présente une diversité de prairies qui permet de remplir une diversité de fonctions à l'échelle de l'exploitation agricole et une mosaïque de prairies permanentes et temporaires à l'échelle du paysage qui laisse préjuger de la fourniture de services intrants pour les cultures.

SUMMARY

The glorious diversity of grasslands: 3. Services provided from farm to landscape in Aveyron

Previous articles (Duru et Therond, 2018 ; Duru et al., 2019) lay the conceptual and methodological foundation for an analysis of the range of goods and services provided by grasslands to agriculture and society. This article presents an illustration of the operationalization of the proposed approach at the plot and landscape levels.

Simplified botanical surveys were used to characterize grasslands (permanent, temporary, less than or more than 5 years old; n=208) on six cattle farms in the north and west of the Aveyron department in terms of growth temporality (early vs. late, spread vs. seasonal) and the level of services they provide. It is shown that temporary grasslands of less than 5 years of age, with a higher average percentage of leguminous plants, present the most extreme growth temporalities (early or late, and important spreading).

The evaluation of some services (pollination, weed control, soil stabilization and carbon sequestration) provided by grasslands at the scale of the Aveyron department was done by mobilizing algorithms establishing the link between spatial distribution of the different types of grasslands and services to interpret the map of land use at the grain level of the CAP blocks. This mapping shows a high average level of services, but differences according to the share of grasslands less than 5 years old. In general, the Aveyron department presents a diversity of grasslands that allows to fulfill a diversity of functions at the farm scale and a mosaic of permanent and temporary grasslands at the landscape scale that suggests the provision of input services for crops.

AUTEURS

1 : UMR 1248 AGIR, INRAE, Université Toulouse, INPT, 31326 Castanet Tolosan, France

2 : US-ODR, INRAE, Université Toulouse, INPT, 31326 Castanet Tolosan, France

3 : UMR 1132 – LAE, INRAE, 28 rue de Herrlisheim, 68000 Colmar, France

MOTS-CLES : Agroécologie, composition fonctionnelle, services écosystémiques, fourrage, légumineuse, prairie, paysage.

KEY-WORDS: Agroecology, functional composition, ecosystem services, forage, legume, grassland, landscape.

REFERENCE DE L'ARTICLE : Duru M., Meillet A., Theau J.P., Poméon T., Therond O., (2021). « La prairie dans tous ses états : 3. Services fournis de la ferme au paysage en Aveyron », *Fourrages*, 246, 37-49

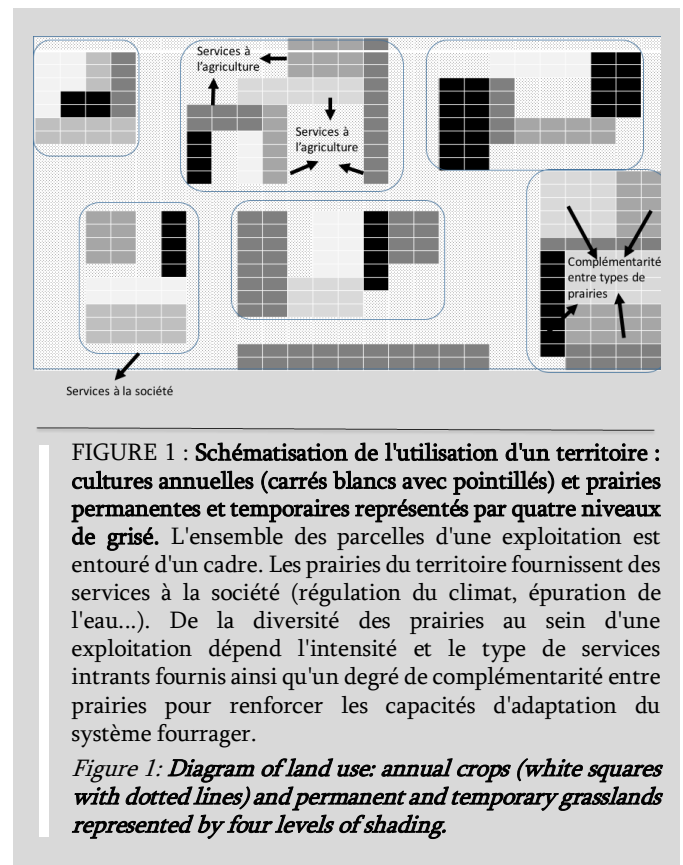
Introduction

Depuis le début des années 70, on observe globalement une diminution des surfaces en prairies en France mais avec des dynamiques différentes selon les types : réduction forte des prairies permanentes, effondrement des prairies artificielles (-73 %) et augmentation des prairies temporaires de 19 %. Cette tendance baissière est observée malgré les services écosystémiques qu'elles fournissent (réduction de l'érosion et des pertes de nutriments, épuration de l'eau et régulation des flux...) et l'intérêt qu'elles présentent pour les animaux (ration complète, souplesse d'utilisation...) et les consommateurs (meilleure conformité des pratiques d'élevage aux attentes sociétales, qualité nutritionnelle des produits...) (Michaud *et al.*, 2020). Pour les éleveurs, leur utilisation nécessite de gérer la forte variabilité quantitative et qualitative des fourrages entre saisons et années, qui s'accroît avec le dérèglement climatique (Sautier *et al.*, 2013). Nous faisons l'hypothèse qu'enrayer le déclin des prairies nécessite de disposer d'un cadre d'analyse commun à tous les types de prairies pour mieux évaluer la complémentarité qu'elles peuvent avoir pour fournir des services écosystémiques de l'échelle de la parcelle à celle du paysage. D'autre part, il est connu que la diversité des ressources fourragères est une des composantes de la capacité d'adaptation des systèmes d'élevage pour faire face à la variabilité de ces ressources (Rigolot *et al.*, 2019).

Les travaux antérieurs ont surtout porté sur les services fournis par les prairies permanentes à l'éleveur (Duru *et al.*, 2011 ; 2013), ou à la société (Carrère *et al.*, 2012), tout particulièrement en détaillant les spécificités de différents types de prairies. Au-delà de l'estimation de la productivité des prairies, ces recherches ont permis d'introduire la notion de souplesse d'utilisation (Duru *et al.*, 2010) due soit à la diversité de la végétation au sein d'une prairie, soit à des différences de composition entre prairies au sein de l'exploitation. Cependant, ces recherches n'ont pas considéré conjointement les prairies permanentes et temporaires qui co-existent souvent dans les exploitations d'élevage. Enfin, elles n'ont pas pris en compte certains services qui devraient être appréhendés en agrégeant à l'échelle d'un territoire les résultats obtenus à l'échelle des parcelles (stockage de carbone) ou en prenant en compte les relations spatiotemporelles entre couverts végétaux à l'échelle du paysage (pollinisation, régulation des adventices). L'évaluation du service de régulation du climat (séquestration du carbone) ou du cycle de l'azote peut être faite à l'échelle d'un territoire en cartographiant l'occupation du sol, et elle peut être affinée en connaissant la durée et la composition fonctionnelle de la prairie. Quant aux régulations biologiques, il est nécessaire de collecter des informations sur la composition et la configuration du paysage. Un enjeu est donc de combiner des sources de données différentes pour avoir une vision systémique du

rôle des prairies à des fins privées (optimisation de l'utilisation des prairies dans les systèmes d'élevage) et de politiques publiques (plans climat, nitrates, écophyto).

Pour répondre à ces questions, nous avons construit un cadre d'analyse reposant sur la diversité des prairies dans des exploitations et un paysage (Figure 1), ainsi qu'une batterie d'indicateurs. Dans un précédent article (Duru et Therond, 2018), nous avons synthétisé les relations existantes entre, d'une part la composition fonctionnelle de la végétation prairiale et la distribution des prairies dans les rotations et les paysages et, d'autre part, le niveau et la dynamique de production de l'herbe et les services écosystémiques fournis tels que la pollinisation, les régulations des bioagresseurs et des adventices, du cycle de l'eau, du climat (séquestration du carbone) et de la stabilisation des sols (contrôle de l'érosion). Certains de ces services sont utiles à l'agriculture dans la mesure où ils permettent de réduire le besoin en intrants de synthèse, alors que d'autres sont utiles à la société lorsqu'ils permettent de conserver de bonnes conditions de vie.



Ce cadre d'analyse a ensuite été mobilisé pour définir des indicateurs permettant d'évaluer les biens et services dépendant principalement de la composition fonctionnelle de la prairie (Duru *et al.*, 2019). Ils permettent de renseigner la productivité des prairies, la saisonnalité de croissance, centrée sur le printemps ou le début d'été, ainsi que la forme du pic de croissance (pic marqué ou étalé) en fonction du degré de

complémentarité temporelle entre espèces. Pour les services dépendant de la place des prairies dans les rotations et les paysages, l'évaluation a été basée sur des algorithmes établis précédemment dans le cadre de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles (Therond et Tibi, 2017). Compte tenu de l'état des connaissances, on retiendra les services de pollinisation, de régulation des adventices et du climat (séquestration du carbone) ainsi que de stabilisation des sols (contrôle de l'érosion). L'objectif de ce troisième article est d'illustrer l'intérêt de notre cadre analytique et des indicateurs associés, en prenant le département de l'Aveyron comme cas d'étude.

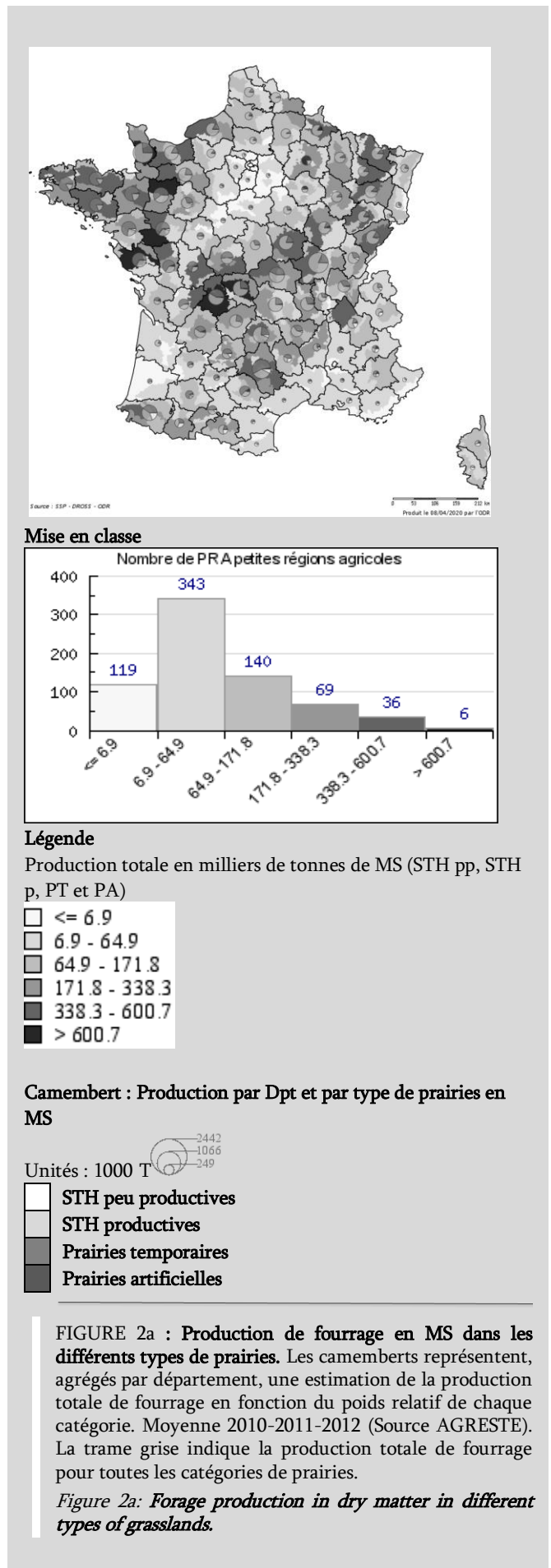
1. Matériel et méthodes

1.1. Occupation du sol dans le département de l'Aveyron et exploitations étudiées

◆ Occupation du sol

A l'échelle de la France, le département de l'Aveyron apparaît comme un de ceux où la surface en prairies est la plus importante, avec une proportion plutôt équilibrée entre surfaces toujours en herbe et prairies temporaires (Figure 2a). La zone sud du département est à dominante de prairies temporaires, alors que le centre et surtout le Nord comprennent une proportion plus importante de prairies permanentes (Figure 2b).

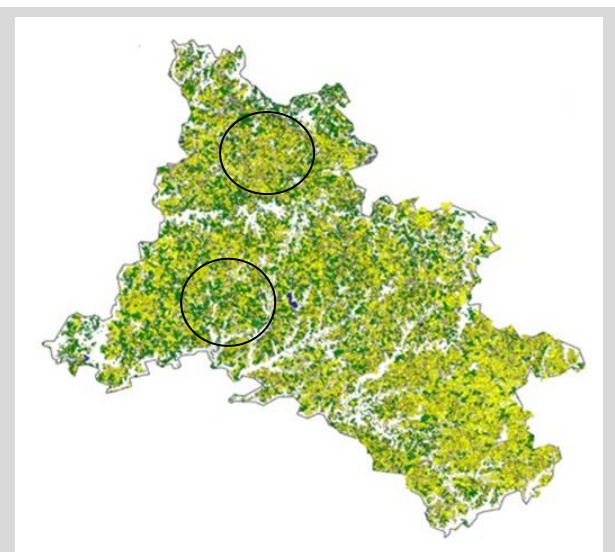
Afin d'évaluer les services écosystémiques liés à la distribution spatiotemporelle des prairies dans le département de l'Aveyron, nous avons utilisé la cartographie des séquences de cultures et prairies développée par l'UMR AGIR de l'INRA issue de l'analyse des Registres Parcellaires Graphiques de 2006 à 2012 (voir méthode dans Therond *et al.*, 2017). Cette base de données décrit les 11,5 millions de séquences de cultures de rente et/ou de prairies au sein des 6 millions d'îlots PAC déclarés par environ 400 000 exploitations en 2012. Elle permet d'analyser la distribution spatiale des prairies permanentes productives et peu productives (landes, estives...), des prairies temporaires et des prairies artificielles de légumineuses. Concernant les deux dernières catégories, elle décrit les enchaînements de prairies et de cultures et permet donc d'estimer, par exemple, la durée d'implantation des prairies et des cultures respectivement dans chaque séquence concernée.



Région	Orientation	Ferme	SAU	Céréales (%)	PT<=5 ans	PT>5ans	PP	Apport d'azote (kg/ha)	Chargement (UGB/ha)
Plateau	viande	1	85	29	9	1	40	55	0.9
Plateau	lait	2	116	19	52	1	24	115	1
Plateau	lait	3	37	0	22	30	49	60	1.4
Montagne	viande	4	76	21	29	11	39	30	1.55
Montagne	viande	5	62	19	48	0	23	115	1.35
Montagne	viande	6	62	35	32	6	45	10	1

TABLEAU 1 : Caractéristiques des exploitations étudiées

Table 1: Characteristics of the studied farms



Légende

Types d'occupation du sol

- Landes estives majoritaires
- Prairies permanentes majoritaires
- Prairies temporaires majoritaires
- Pas de prairie dans l'îlot

Limites de PRA

- Segala (Aveyron)

FIGURE 2b : **Distribution spatiale des différents types de prairies.** Carte construite à partir de l'analyse des données des Registres Parcellaires Graphiques des années 2006 à 2010. Les deux cercles indiquent chacun où sont situées 3 des exploitations.

Figure 2b: *Spatial distribution of different grassland types*

◆ Caractéristiques des exploitations étudiées

Nous avons sélectionné six exploitations d'élevage de ruminants, situées à une altitude de 600-900m dans le nord (montagne) et l'ouest (plateau) du département

de l'Aveyron (Figure 2b), ayant à la fois des prairies permanentes et temporaires (Tableau 1). Les exploitations du nord sont assez représentatives des systèmes d'élevage bovin viande fortement orientés vers la production de brouillards de race Aubrac, alors que celles de l'ouest sont plus diversifiées. La part de prairies temporaires de moins de 5 ans varie de 9 à 52 % et la part de céréales de 0 à 35 %, sans tendance selon la petite région ou l'orientation de production.

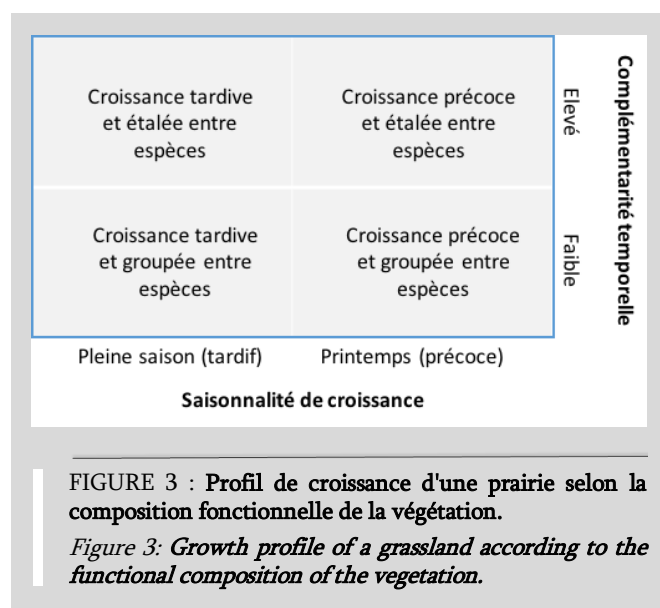
Nous avons effectué des relevés botaniques simplifiés pour toutes les prairies (n = 208) de chaque exploitation suivant la méthode de Theau *et al.*, (2010). Nous avons caractérisé la composition de chaque prairie *via* plusieurs indicateurs (Duru *et al.*, 2019) : la composition fonctionnelle de la végétation pour les deux dimensions de la stratégie de croissance des plantes (moyenne pondérée par l'abondance du type fonctionnel de la plante), le pourcentage de légumineuses et le niveau des apports d'azote (inorganique, organique, restitutions au pâturage) et le régime de défoliation (fauche et pâturage). Au niveau de l'ensemble de l'échantillon, la majorité des prairies permanentes sont utilisées pour le pâturage des vaches et des génisses (108/124), alors que les prairies temporaires de moins de 5 ans ou de plus de 6 ans sont majoritairement destinées à la fauche, respectivement, 63/67 et 14/17.

1.2. Evaluation des services

◆ A l'échelle de la ferme

La capacité d'adaptation du système fourrager aux perturbations dépend de la diversité des prairies. Celle-ci peut s'examiner au sein d'une prairie et entre prairies. Pour caractériser cette diversité à l'échelle de la parcelle, nous avons retenu deux indicateurs de la composition fonctionnelle de la végétation présentés précédemment (Duru *et al.*, 2019). Le premier croise les informations sur la saisonnalité du pic de production au printemps (précoce ou tardif) avec celles sur la stratégie de croissance (rapide *vs* lente) des espèces dominantes. Le second renseigne sur la complémentarité temporelle entre espèces. Il indique s'il y a une différence de saisonnalité entre les espèces composant la prairie,

autrement dit, si la croissance est synchrone ou non au sein d'une prairie. C'est un indicateur de souplesse d'utilisation (Duru *et al.*, 2010). Ces deux indicateurs permettent de positionner chaque prairie d'une exploitation pour son profil de croissance, plutôt précoce ou tardif, avec des espèces se ressemblant ou non de par leur phénologie (Figure 3). En caractérisant chacune des prairies d'une exploitation, on peut donc savoir dans quel quadrant elle se trouve et si elles sont semblables ou différentes, et en déduire des informations pour la gestion et la sensibilité aux perturbations du climat. Nous avons examiné en outre les relations entre pourcentage de légumineuses et apport d'azote. Dans les deux cas, nous avons analysé comment se différencient les trois types de prairie (permanentes, prairies temporaires \leq ou $>$ 5 ans).



Pour illustrer des situations de convergences et antagonismes entre services, nous avons sélectionné des prairies singulières où la probabilité d'avoir plusieurs services fournis était faible ou élevée. A cette fin, sur la base des propositions de Duru *et al.*, (2019), nous avons déterminé les compositions et les pratiques de gestion de la prairie les plus et les moins favorables pour la capture des ressources (indice de complémentarité temporelle entre groupes d'espèces) et la limitation des émissions d'N. Les seuils pour les indicateurs de composition fonctionnelle des prairies et l'apport d'N dépendant du contexte (Duru et Vertès, 2017), la sélection considérée n'est qu'un exemple permettant de distinguer des situations contrastées. Seules des mesures de pertes d'N et de séquestration de C permettraient de tester la validité de ces indicateurs. Sur ces bases, nous avons échantillonné des prairies avec un faible apport d'N ($N < 40$ kg / ha), une abondance élevée en légumineuses (> 20 %) combiné ou non à un indice de diversité fonctionnelle élevé ($> 0,6$). A l'opposé, nous avons distingué les prairies avec un apport élevé en N ($N > 120$ kg / ha) et une abondance faible en légumineuses (< 10 %) combiné ou non à un indice de diversité fonctionnelle faible ($< 0,3$). Le premier

groupe correspond à des situations où il est attendu une capture élevée des ressources (lumière, nutriments) et possiblement une plus grande séquestration du carbone et des impacts émissions d'azote faibles, à l'inverse du second groupe.

◆ A l'échelle du territoire

Pour illustrer le type de méthodes d'évaluation des services écosystémiques fournis par les prairies à l'échelle des parcelles *via* leur importance dans les rotations et leur place dans les paysages, nous reprenons les résultats de l'étude EFESE-Écosystèmes Agricoles (Therond *et al.*, 2017). Alors que cette étude couvre la France métropolitaine et une quinzaine de services, nous focalisons notre analyse sur les services de pollinisation, de régulation biologique des adventices et de stabilisation des sols en Aveyron. Nous présentons aussi une méthode simplifiée pour estimer le service de régulation du climat *via* le stockage de carbone dans les prairies temporaires.

Le service de pollinisation a été évalué selon la méthodologie proposée par Zulian *et al.*, (2013) afin de prendre explicitement en compte les effets des habitats semis-naturels, dont les prairies, sur l'abondance des pollinisateurs. L'estimation du potentiel de pollinisation est basée sur la prise en compte (i) d'un indice d'abondance des pollinisateurs dans chaque classe d'occupation du sol, à partir d'estimations des sources de nourritures (*floral availability*) et des sites de nidification (*nesting suitability*) obtenues dans la littérature ou à dire d'expert ; la valeur de l'indice est compris entre 0 (zone urbanisée) et 1 (prairies naturelles par exemple), et (ii) d'une distance moyenne de déplacement des abeilles solitaires (200m) pour la recherche de nourriture. Dans cette approche, les prairies, quelle que soit leur nature, sont considérées comme de très bonnes sources de nourriture et d'habitat pour les pollinisateurs. Du fait de la méthodologie utilisée, les résultats de cette analyse ont été représentés sur une grille de 100 x 100 m.

Le service de régulation des adventices a été évalué suivant deux grandes composantes : (i) la prédation des graines d'adventices par les carabes et (ii) la régulation de la croissance des adventices (et donc de la « pluie de graines ») liée aux séquences de culture/prairies (Bohan *et al.*, 2017). Pour la première composante, une revue de la littérature scientifique a été effectuée afin d'identifier les caractéristiques du paysage susceptibles d'expliquer l'abondance de carabes consommateurs de graines. Il a ainsi été mis en évidence l'importance du poids des grandes cultures et des prairies permanentes dans le paysage pour expliquer l'abondance de carabes. Une analyse statistique d'un jeu de données recueilli en Côte-d'Or sur l'abondance des carabes (Petit *et al.*, 2017) a ensuite été conduite afin de modéliser la relation entre les surfaces des grandes cultures et des prairies permanentes et l'abondance de carabes omnivores d'une part et granivores d'autre part. Les modèles statistiques, pour chacun des deux types de carabes, montrent qu'ils

sont d'autant plus abondants dans une parcelle que les surfaces des prairies et de grandes cultures dans un rayon de 1 km sont importantes. Ces modèles ont ensuite été appliqués pour estimer l'abondance des carabes considérée comme un proxy de leur activité de prédation des graines d'adventices. Du fait de la méthodologie utilisée, les résultats de cette analyse ont été représentés sur une grille de 2 x 2 km.

L'effet des rotations sur la régulation des adventices a été estimé en se basant sur les travaux de Bohan *et al.*, (2011), qui ont évalué les effets d'un jeu de séquences cultures/prairies sur 3 ans sur l'abondance de la banque de graines dans une parcelle sur la base d'un important jeu de données issues d'expérimentations réalisées en Angleterre. Ils en ont alors déduit une liste de séquences types sur 3 ans et une abondance moyenne de la banque de graines associée. Dans notre cas, chaque séquence observée dans les îlots PAC a alors été associée à une séquence type de Bohan *et al.*, (2011), et, *in fine*, à la quantité de graines associée. Cette abondance est alors considérée comme un proxy de l'effet de la rotation sur la dynamique des adventices. Du fait de la méthodologie utilisée, les résultats de cette analyse ont également été représentés sur une grille de 2 x 2 km.

Pour estimer le service de stabilisation des sols et de contrôle de l'érosion, une version améliorée du modèle empirique MESALES (Modèle d'Evaluation

Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols) a été utilisée (Choler et Le Bissonnais, 2017). Ce modèle permet d'estimer le risque d'érosion à partir d'un arbre de décision qui détermine l'aléa érosif en considérant de manière séquentielle les processus physiques de ruissellement et d'érosion qui sont déterminés par l'utilisation du sol (utilisation du RPG et d'images de télédétection pour estimer une couverture du sol moyenne par saison), la battance (données de sol), la pente (modèle numérique de terrain), l'érodibilité du sol (données de sol), et l'érosivité des précipitations (données météorologiques). Dans cette modélisation, l'effet du type d'occupation du sol est largement dominant par rapport aux autres effets. Une occupation du sol de type prairie, c'est-à-dire un couvert continu dans le temps et l'espace, est considéré comme le meilleur facteur de stabilisation des sols et de contrôle de l'érosion. Du fait de la méthodologie utilisée, les résultats de cette analyse ont été représentés sur une grille de 100 x 100 m.

Concernant le service de régulation du climat, le stockage de carbone sous prairie dépend beaucoup des modalités de défoliation et fertilisation (Lemaire *et al.*, 2015) et de la durée des prairies temporaires dans la rotation (Pellerin *et al.*, 2019). Comme nous ne disposons pas des informations sur les modes de conduite des prairies à l'échelle du département de l'Aveyron, nous avons donc focalisé notre analyse sur l'effet du poids temporel des prairies temporaires dans

Services	Indicateurs	Données d'entrée	Références
Pollinisation	Indice de potentiel de pollinisation	- Cartographie des occupations des sols (100 x 100 m) - Caractérisation des habitats en termes de sources de nourritures et qualité comme site de nidification - Distance de vol des abeilles sauvages	Zulian <i>et al.</i> , (2013)
Régulation des adventices	- Abondance potentielle de carabes granivores et omnivores (nombre carabes/ha) - Abondance moyenne potentielle de la banque de graines en fonction de la rotation (nombre graines/m ²) - Abondance moyenne potentielle de la banque de graines en fonction de la rotation (nombre graines/m ²)	- Part de prairie et grandes cultures dans un pixel de 1 km - Séquences dans chaque îlot Registre Parcelaire Graphique (RPG, 2006-2014) - Table de relation entre rotation type et banque de graines moyenne	Bohan <i>et al.</i> , (2017) ; Petit <i>et al.</i> , (2017) Bohan <i>et al.</i> , (2011)
Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion	- Quantité de sol stabilisé (t sol/ha)	- Cartographie utilisation du sol (100 x 100 m) - Couverture du sol moyenne par saison (télédétection) - Données sol pour estimer battance et érodibilité du sol - Pente (modèle numérique de terrain) - Données météorologiques pour estimer l'érosivité des précipitations	Choler et Le Bissonnais (2017)
Régulation du climat (séquestration de carbone)	Durée relative des prairies temporaires dans la séquence de culture (%)	- Séquences de culture/prairie dans chaque îlot du RPG (2006-2014)	Pellerin <i>et al.</i> , (2019)

TABLEAU 2 : Services évalués à l'échelle du département Aveyron, indicateurs associés, données d'entrée nécessaires pour leur estimation et références présentant la méthode d'évaluation.

Table 2: Services evaluated at the scale of the Aveyron department, associated indicators, input data necessary for their estimation and references presenting the evaluation method.

la rotation. De ce fait, le stockage sous prairie permanente n'a pas pu être analysé ci-après. A cette fin, nous avons utilisé les résultats de l'étude INRA 4p1000 (Pellerin *et al.*, 2019) sur la relation entre durée dans la rotation des prairies temporaires relativement à celle des cultures annuelles. La revue de la littérature réalisée dans cette étude montre que les rotations peuvent être stockantes à partir d'une durée de la phase prairie par rapport à la durée totale de la rotation de l'ordre de 30 % à 50 %, voire plus suivant les teneurs initiales en carbone. Ne disposant pas des informations sur les teneurs en carbone pour notre travail, nous avons retenu à titre illustratif un seuil conservateur de durée de 50 % indiquant que la prairie a un effet positif sur le stockage de carbone. Du fait de la méthodologie utilisée, les résultats de cette analyse ont été représentés à l'échelle de l'ilot.

Étant donné que la méthode propre à chaque service a été mise en œuvre par des équipes différentes suivant des méthodologies dédiées présentant des contraintes différentes en termes de données et de résolution spatiale pertinente, les résolutions de présentation des résultats diffèrent. Il n'a donc pas été possible de conduire une analyse fine des relations entre les différents services, permettant d'examiner les potentiels antagonismes ou synergies entre services. Aussi, seule une comparaison visuelle des grands patrons spatiaux par service a été réalisée.

2. Résultats et discussion

2.1. Evaluation de l'aptitude des prairies à fournir des biens et services aux niveaux de la parcelle et du système fourrager

◆ Croissance, temporalité de croissance et services au niveau de la parcelle

Les prairies temporaires ont généralement un pourcentage plus élevé de plantes avec une stratégie de capture de ressources que les prairies permanentes (axe Y, Figure 4a). Pour ces dernières, la part des espèces à stratégies de capture est corrélée positivement à la part des espèces ayant une stratégie de croissance précoce ($P < 0,001$), alors qu'une telle relation n'est pas trouvée pour les prairies temporaires. Les prairies temporaires ayant les indices de saisonnalité de croissance les plus tardifs (points sur la partie gauche de la figure) comprennent une part importante de luzerne alors que celles ayant les indices les plus précoces (points sur la partie droite de la figure) contiennent des proportions importantes de ray-grass italien.

Les prairies temporaires <5ans ont en moyenne des indices de complémentarité temporelle entre espèces supérieurs aux autres prairies (axe Y sur la Figure 4b). Ces indices sont plus faibles pour les prairies temporaires de plus longue durée. Ceci signifie qu'au fil des années, la diversité intra communauté tend à se

réduire ($P < 0,01$). Ces évolutions sont cohérentes avec l'augmentation au fil des années de la synchronicité entre espèces observées expérimentalement (Meilhac *et al.*, 2019).

Pour les prairies permanentes et les prairies temporaires > 5 ans, ces indices sont corrélés positivement aux indices de saisonnalité de croissance ($P < 0,01$) (Figure 4b) ; autrement dit, plus les prairies sont précoces, plus grande est l'hétérogénéité entre espèces dans les temporalités de croissance.

Pour les prairies temporaires de courte durée, les indices de complémentarité temporelle entre espèces sont plus élevés que pour celles ayant une valeur intermédiaire d'indices de saisonnalité de croissance (Figure 4b). Cela correspond à des prairies composées de ray-grass italien ou hybride, trèfle violet, dactyle et luzerne. Les prairies avec un indice élevé de complémentarité temporelle entre groupes d'espèces sont observées à la fois pour des pourcentages faibles et élevés en légumineuses (non illustré), ce qui signifie que quand le pourcentage en légumineuses est faible, c'est la diversité des espèces de graminées, en particulier les ray-grass, qui est à l'origine d'un indice de complémentarité temporelle élevé.

La proportion de légumineuses est la plus faible dans les prairies permanentes et elle diminue avec l'apport d'azote ($P < 0,001$). Elle est plus élevée pour les prairies temporaires, surtout pour celles de moins de 5 ans. Pour l'ensemble des prairies temporaires, la proportion de légumineuses diminue significativement avec l'âge des prairies ($r^2 = 0,43$; $P < 0,01$), mais ne varie pas significativement avec l'apport en N (Figure 4c). Pour les apports d'N inorganique les plus élevés, la fixation d'N diminue (Unkovich, 2010) ; en conséquence, des pertes d'N sont possibles malgré la présence de légumineuses.

En mobilisant la grille d'analyse présentée figure 2, on en déduit que ce sont les prairies temporaires de moins de 5 ans qui sont les plus productives et qui présentent le plus de différences entre elles en termes de saisonnalité et de synchronicité de croissance entre espèces, offrant ainsi une large gamme de profils de croissance se prêtant à une diversité d'usage et pouvant jouer un rôle tampon face à la variabilité du climat et au changement climatique (Dumont *et al.*, 2020). En outre, on observe une hiérarchie entre les trois types de prairies pour la croissance potentielle avec des différences de saisonnalité (printemps *vs* pleine saison) les plus marquées pour les prairies permanentes (Figure 5). Le niveau de complémentarité temporelle entre groupes d'espèces qui est un indicateur de la forme du pic de croissance (pic marqué ou étalé) est le plus élevé pour les prairies temporaires de moins de 5 ans. Le pourcentage de légumineuses dans la végétation est le plus important pour ces prairies, en particulier pour celles ayant une saisonnalité tardive.

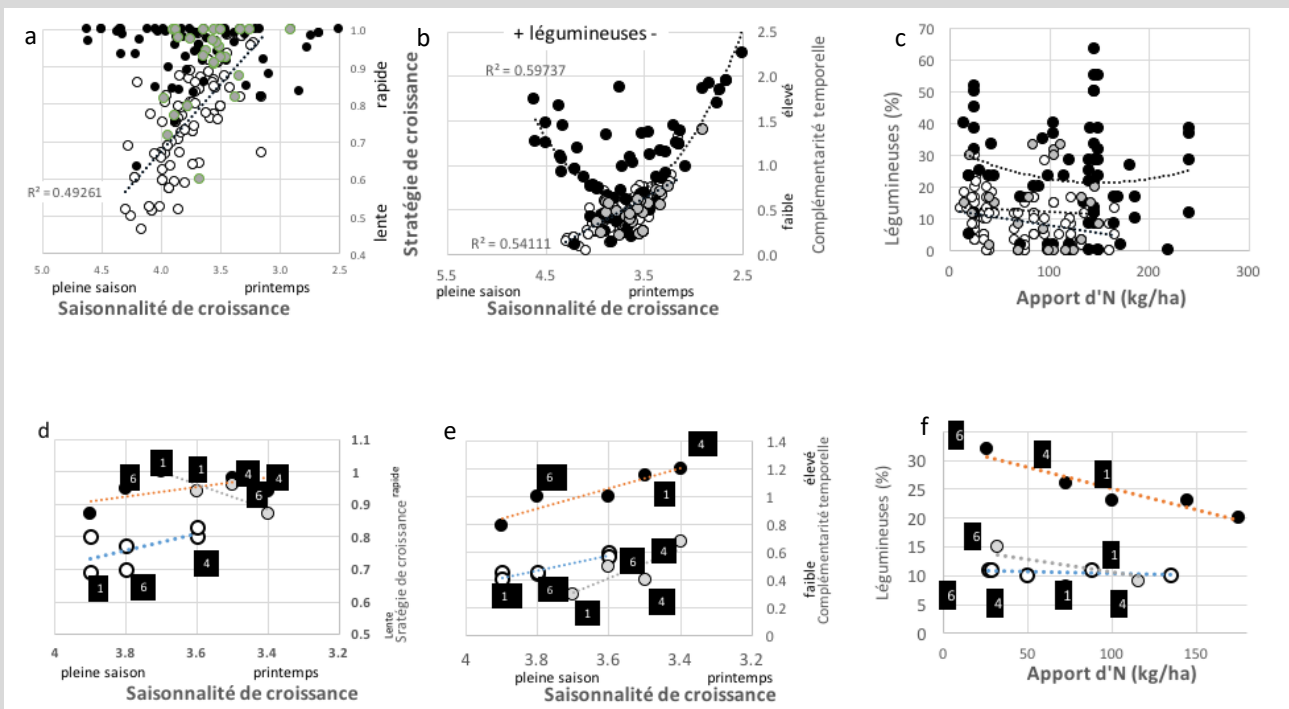


FIGURE 4 : Caractérisation des trois types de prairies (permanentes : rond vide ; temporaires de plus de 5 ans : rond gris ; temporaires de moins de 5 ans : rond noir) à l'échelle de la parcelle (a-c) et de la ferme (avec mention du numéro pour les fermes 1, 4 et 6) (d-f) pour :

- un indicateur de stratégie de croissance en fonction d'un indicateur de la saisonnalité de croissance (a, d)
- un indicateur de complémentarité temporelle de croissance en fonction d'un indicateur de la saisonnalité de croissance (b, e)
- la proportion de légumineuses en fonction des apports d'azote (c, f)

Les courbes en pointillés servent à faciliter la lecture des graphiques.

Figure 4: Characterization of the three types of grassland (permanent: empty circle; temporary of more than 5 years old: grey circle; temporary of less than 5 years old: black circle) at the plot (a-c) and farm level.

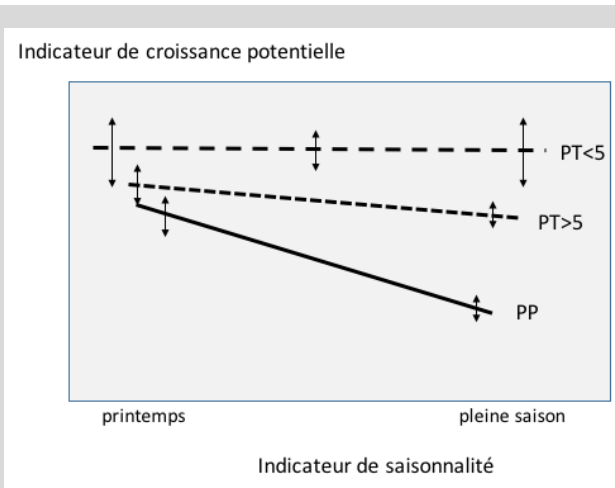


FIGURE 5 : Relations schématiques entre la saisonnalité de croissance et la croissance potentielle pour les prairies permanentes (PP) et temporaires (PT) de plus et de moins de 5 ans ; la longueur des flèches verticales donne une indication du niveau de complémentarité temporelle entre groupes d'espèces.

Figure 5: Schematic relationships between growth seasonality and potential growth for permanent (PG) and temporary (TG) grasslands over and under 5 years old.

La caractérisation des synergies et compromis entre services sur la base de la complémentarité temporelle entre groupes d'espèces et des pratiques de gestion de la prairie, ont montré que les caractéristiques des prairies qui permettent la meilleure capture des ressources et les émissions d'N les plus faibles s'observeraient principalement pour les prairies temporaires et les prairies permanentes fauchées, en particulier lorsque l'on considère les seuils les plus contraignants pour les trois critères. A l'inverse, cette configuration s'observerait peu pour les prairies permanentes pâturées, quelles qu'elles soient. Les situations les moins favorables à la capture des ressources et à la rétention de l'azote seraient les plus fréquentes pour les prairies temporaires et les prairies permanentes pâturées les plus fertilisées (Tableau 3).

Les prairies dites pâturées ne sont jamais fauchées, alors que les prairies fauchées peuvent l'être très tôt au printemps (déprimage) ou après une première coupe.

Type et gestion de la prairie	Caractéristiques des prairies pour un niveau élevé de services écosystémiques (N<40 ; L>20) et (DF>0,6)		Caractéristiques des prairies pour un niveau faible de services écosystémiques (N>120 ; L<10) et (DF<0,3)	
	(N<40 ; L>20) et (DF>0,6)	(N<40 ; L>20) et/ou (DF>0,6)	(N>120 ; L<10) et (DF<0,3)	(N>120 ; L<10) et/ou (DF<0,3)
Prairies permanentes pâturées (83)	2	22	16	24
Prairies permanentes fauchées (16)	19	38	13	13
Prairies temporaires (>6 ans) (20)	10	40	10	30
Prairies temporaires (<5 ans) (67)	10	36	3	25

TABLEAU 3 : Pourcentage de parcelles par type de prairies et de gestion selon leur composition (taux de légumineuses : L, et indice de complémentarité temporelle entre groupes d'espèces : DF) et la fertilisation (apport en N) favorable et défavorable pour la séquestration en C, les émissions d'N et la production primaire nette (d'après la figure 4) N: kg / ha; L: légumineuses [%]; FD: indice de diversité fonctionnelle.

Table 3: Percentage of plots by grassland type and management by composition

◆ Diversité des prairies au niveau du système fourrager

Lorsque les indicateurs établis au niveau de la parcelle sont agrégés par type de prairies (permanentes vs temporaires) au niveau de la ferme, on observe des tendances similaires. Les prairies temporaires ont une plus grande part d'espèces à stratégie de croissance élevée (Figure 4d, axe des ordonnées). Les indices de diversité pour la saisonnalité de croissance (Figure 4d, e, abscisse) sont corrélés positivement aux indices de productivité (Figure 4d) et de complémentarité temporelle entre groupes d'espèces (Figure 4e). Les indices de complémentarité temporelle entre groupes d'espèces sont toujours les plus élevés pour les prairies temporaires de courte durée (Figure 4e, ordonnée). Les prairies temporaires de courte durée ont toujours une proportion de légumineuses supérieure aux autres types de prairies (Figure 4f).

Néanmoins, des différences s'observent entre exploitations. Ainsi, les indices de saisonnalité de croissance des 3 types de prairies sont similaires et centrés sur le printemps pour l'élevage 4, alors qu'ils sont très dépendants des types de prairies pour les élevages 1 et 6 (Figure 4d, abscisse). L'élevage 1 ayant des indices de productivité plus faible et/ou des indices

de saisonnalité plus élevés que les élevages 4 et 6, il est susceptible d'avoir des prairies qui séquestrent plus de carbone dans le sol. L'élevage 4 se singularise par des productions centrées plus sur le printemps que les élevages 1 et 6 (Figure 4e). Il affiche des indices de diversité fonctionnelle les plus élevés, offrant la possibilité d'une capture des ressources plus importante et une flexibilité de gestion plus grande.

Des relations entre taux de légumineuses et apport d'azote (Figure 4f), on peut en déduire que les risques de perte d'azote sont faibles pour l'exploitation 6 mais élevés pour les élevages 1 et 4 (indiqué sur la figure).

Sur la base des cas étudiés, nous constatons qu'un même élevage peut comprendre un large éventail de prairies différenciées de par leur composition fonctionnelle. Les prairies temporaires à base de légumineuses contribuent à amplifier les différences observées entre prairies permanentes (Rudmann-Maure *et al.*, 2008). Cela permet des complémentarités de ressources adaptées à des animaux ayant des besoins nutritionnels différents (vaches productives et improductives, génisses), et à ces animaux d'être nourris à faible coût (Rawnsley *et al.*, 2013 ; Duru *et al.*, 2015). Ces résultats convergent aussi avec ceux de Pembleton *et al.*, (2015), montrant que la diversité des prairies permet d'accroître la productivité et d'allonger la saison de croissance. La diversité des prairies au sein d'un système fourrager constitue un deuxième moyen d'adaptation à la variabilité saisonnière et inter annuelle du climat (Martin *et al.*, 2012).

2.2. Evaluation de l'aptitude des prairies à fournir des services sur la base de leur place dans les paysages

La figure 6 présente les résultats d'évaluation pour les 4 services considérés : pollinisation, régulation biologique des adventices, stabilisation des sols et stockage du carbone. Nous analysons ci-après les

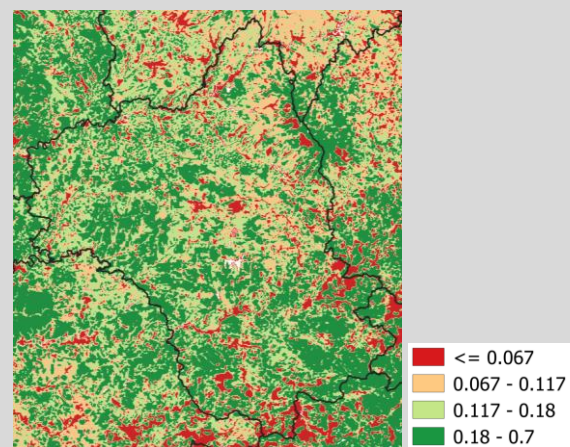


FIGURE 6a : Indice de potentiel relatif de pollinisation. L'indice est sans unité (résolution 100 x 100 m).

Figure 6a : Relative pollination potential index.

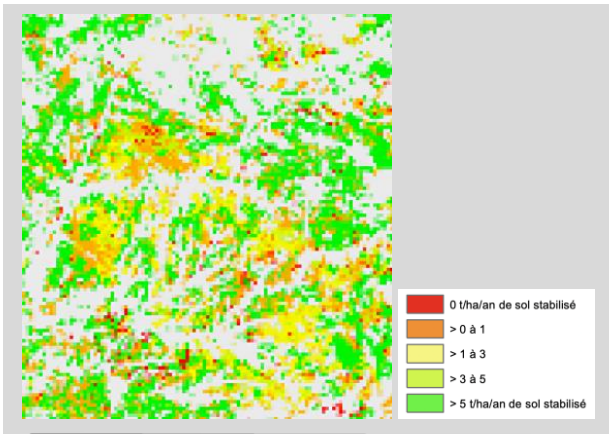


FIGURE 6b : Niveau moyen de service de stabilisation des sols et contrôle de l'érosion, en tonne de sol stabilisé par ha (résolution 100 x 100 m).

Figure 6b: Average level of soil stabilization service and erosion control.

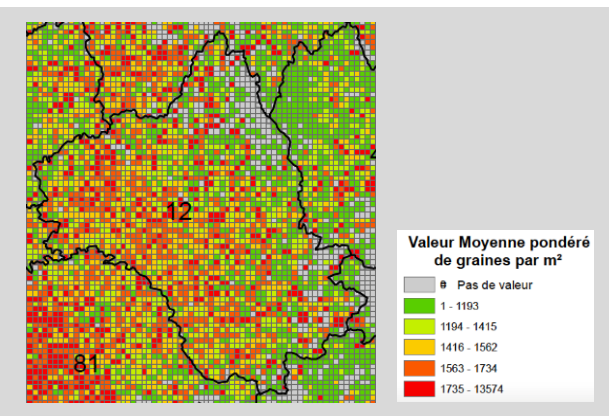


FIGURE 6c : Valeur moyenne pondérée de la banque de graines par m² au sein de mailles de 2 x 2 km liée aux séquences de cultures et prairies dans cette maille.

Figure 6c: Weighted average seed bank value per m² within a 2 x 2 km grid.

résultats pour chacun de ces services puis en matière de co-occurrence.

Du fait d'une distribution régulière et de l'importance des prairies dans le paysage, le niveau potentiel de **pollinisation** est évalué comme élevé dans la très grande majorité des situations de l'Aveyron. On observe cependant que dans certaines vallées, essentiellement assolées en maïs et autres cultures, ce potentiel est considéré comme très bas (pixel rouge, Figure 6a). Notons cependant que la méthode utilisée ici pour évaluer ce service (Zulian *et al.*, 2013) ne permet pas de distinguer les effets des prairies temporaires de ceux des prairies permanentes alors qu'elles pourraient offrir des ressources alimentaires différentes. Cependant, la plus faible richesse floristique potentielle des prairies temporaires ne représente pas obligatoirement un frein important à la pollinisation (Orford *et al.*, 2016).

Comme la prairie représente la classe d'occupation des sols qui a le meilleur potentiel de **stabilisation des sols**, là encore, le niveau de service estimé est très élevé en moyenne en Aveyron (Figure 6b). Les zones à faible niveau de service sont celles dans lesquelles l'enchaînement des cultures conduit à des périodes de sol nu, sur des parcelles en pente, alors que le climat présente un fort potentiel d'érosivité (pluie importante et intense).

De manière contrastée par rapport aux deux premiers services, le niveau potentiel du service de **régulation des adventices par les séquences de cultures/prairies** est le plus souvent faible en Aveyron (Figure 6c). Ce résultat est lié au fait que, dans l'approche de Bohan *et al.*, (2011), la présence de prairies temporaires de 1 à 3 ans a un effet négatif sur la banque de graines (augmentation). Cependant, la catégorisation [séquence type – banque de graines] de ces auteurs a été établie sur la base de résultats d'expérimentation en Angleterre et ne prend en compte que les effets de la prairie sur une séquence de trois ans.

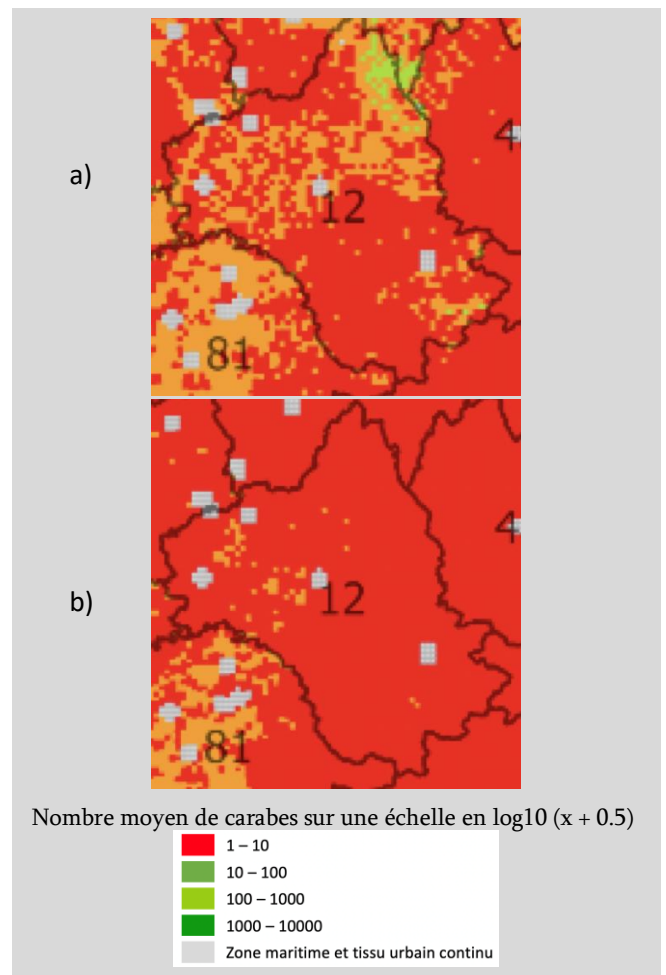


FIGURE 6d : Abondance moyenne de carabes (a) omnivores et (b) granivores dans les parcelles de céréales à paille considérant la composition du paysage dans une maille 2x2 km.

Figure 6d: Average abundance of omnivorous (a) and granivorous (b) carabid beetles in straw cereal plots.

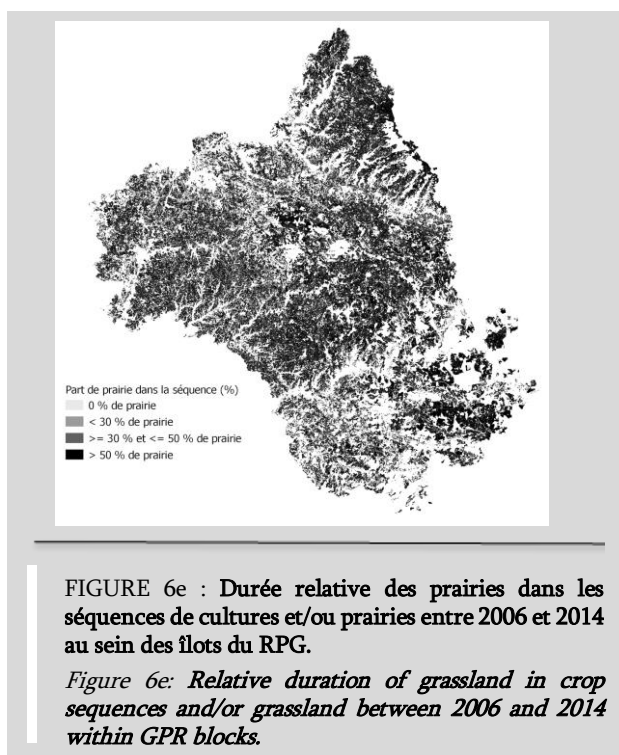


FIGURE 6e : Durée relative des prairies dans les séquences de cultures et/ou prairies entre 2006 et 2014 au sein des flots du RPG.

Figure 6e: *Relative duration of grassland in crop sequences and/or grassland between 2006 and 2014 within GPR blocks.*

De ce fait, les potentiels effets positifs des prairies de longue durée sur la rupture du cycle des adventices ne sont pas pris en compte alors qu’observés par plusieurs travaux (Martin *et al.*, 2020).

Le niveau potentiel de **régulation des adventices par les carabes** est également faible dans la très grande majorité des situations cartographiées (Figure 6d). Dans le modèle statistique utilisé pour évaluer ce service (Bohan *et al.*, 2017), l’abondance des carabes est dépendante de la présence combinée de cultures et de prairies avec un poids équivalent, voire supérieur, pour les cultures. Aussi, l’abondance estimée *via* ce modèle des carabes consommateurs de graines en Aveyron est le plus souvent faible. Cependant, comme le modèle a été développé à partir de données issues de la Côte-d’Or, il est possible qu’il traduise mal la relation entre paysage et abondance des carabes dans des paysages et climats comme ceux de l’Aveyron.

Enfin, considérant que le poids temporel des prairies dans les séquences de culture est très important en Aveyron, leur effet sur le stockage de carbone peut être considéré comme majeur et significatif dans la très grande majorité des rotations combinant culture(s) et prairies (Figure 6e). Notre méthode d’évaluation, basée uniquement sur le poids temporel des prairies dans la séquence de couverts, pourrait être améliorée en prenant en compte la durée effective des prairies. En effet, un stockage significatif est observé dès lors que la prairie dure au moins 3-4 ans, ce qui correspondrait à la durée nécessaire pour le plein établissement du système racinaire (Gastal, 2019).

La comparaison des différentes évaluations spatialisées montre des zones du département dans lesquelles les niveaux de services sont corrélés

positivement ou négativement. Ainsi, dans les vallées, plus particulièrement assolées en cultures (maïs et blés), les niveaux des différents services étudiés sont le plus souvent bas. Sur les plateaux et les coteaux, où les prairies sont plus présentes, voire dominent, un patron général de niveau de services, ou bouquet de services, est le plus souvent observé : haut niveau des services de pollinisation, stabilisation des sols et stockage de carbone et, bas niveau des deux composantes du service de régulation des adventices. Il apparaît donc que la prairie est un support majeur des services de pollinisation, stabilisation des sols et potentiellement de stockage de carbone, mais qu’elle ne l’est peut-être pas systématiquement pour le service de contrôle des adventices suivant les déterminants considérés et les modèles d’évaluation utilisés.

La durée des prairies temporaires est un levier majeur pour augmenter directement le stockage de carbone et donc la fertilité des sols, voire la régulation des adventices (Cf. discussion ci-dessus). Cette durée joue également indirectement sur les autres services évalués, pollinisation et stabilisation des sols, *via* son impact sur la part des prairies dans l’assolement. En effet, par construction, augmenter la durée des prairies dans la rotation, conduit à augmenter les surfaces moyennes annuelles de celles-ci, toute chose égale par ailleurs. Il y a donc ici un potentiel effet synergique de la durée de vie des prairies sur une gamme de services écosystémiques clefs, rendus à la fois à la société et à l’agriculteur.

Enfin, il est important de noter que dans cette région centrée historiquement sur l’élevage, la présence des prairies est également un déterminant majeur des services culturels fournis par les paysages d’Aveyron et donc de la capacité des paysages à répondre aux attentes des populations locales et des touristes en termes d’activité de pleine nature, artistiques, spirituelles, éducatives, etc (Beudou *et al.*, 2017).

Conclusion

Les prairies fournissent une large gamme de biens et de services à l’agriculture et à la société. La production de fourrages et sa temporalité (saisonnalité de la croissance et forme du pic de croissance) dépendent principalement de la composition fonctionnelle de la prairie, alors que les services à l’agriculture et à la société dépendent plus de leur distribution spatiale et/ou temporelle dans les rotations et les paysages. A l’échelle de la parcelle, nous avons montré que les prairies temporaires de courte durée se caractérisent par une plus forte diversité de temporalités de croissance entre espèces au sein de la prairie (complémentarité) et une proportion plus élevée de légumineuses. Les prairies permanentes et les prairies temporaires de longue durée ont des caractéristiques assez proches. Lorsque dominées par des espèces à stratégies de croissance rapides elles sont plus précoces. Les prairies temporaires de longue durée ont une

proportion de légumineuses intermédiaire entre celle des prairies temporaires de courte durée et celle des prairies permanentes. Toutes ces différences s'observent aussi à l'échelle de l'exploitation. Néanmoins, on observe des différences entre élevages : certains présentent des similitudes pour les trois types de prairies en termes d'apport d'azote (faible *vs* élevé) ou de saisonnalité de croissance (précoce *vs* tardive) alors que pour d'autres fermes ces caractéristiques diffèrent entre types de prairies, créant ainsi une très grande diversité en matière de temporalité de croissance. Cette diversité peut contribuer à la résilience du système fourrager face à des aléas (Dumont *et al.*, 2020). La méthode proposée constitue donc un outil fournissant un diagnostic plus complet que ce qui est fait usuellement à partir de relevés botaniques simplifiés. Il importerait de valider la pertinence de ces catégorisations par les éleveurs eux-mêmes afin d'évaluer les avantages qu'ils en retirent et d'examiner si les différences entre élevages proviennent des différences de visions du monde qu'ils portent (Cayre *et al.*, 2018).

Au-delà des conditions de fourniture de biens, les prairies du fait de leur place dans les rotations et dans les paysages fournissent des services à l'agriculture et à la société. A titre illustratif, les cartographies de l'évaluation de quelques-uns de ces services pour le département de l'Aveyron ont permis de montrer des différences de niveau de services selon leur durée dans la rotation et la part des prairies dans le paysage. Les méthodes d'évaluation spatialisée des services écosystémiques, qui n'en sont qu'à leurs prémices, pourraient notamment aider à définir une proportion de prairies temporaires dans les paysages favorisant la production des cultures (ex : pollinisation, régulation des adventices) et à l'atteinte des objectifs locaux vis-à-vis d'enjeux de société tels que la régulation des changements climatiques ou de l'érosion pouvant conduire à des coulées boueuses. Mais, là encore, la pertinence de ces résultats demande aussi à être validée par une expertise sur le terrain. Ce type de démarche d'évaluation est plus particulièrement appropriée pour accompagner la conception de politiques publiques territorialisées visant le développement de systèmes agroécologiques et paysages agricoles permettant d'atteindre des objectifs de durabilité fixés aux systèmes et territoires agricoles.

En définitive, les deux approches que nous avons illustrées demanderaient à être hybridées pour dépasser les politiques en silo (climat, nitrate, phyto...). Pour les services à l'agriculture, nous avons montré qu'il importe donc de combiner des analyses à l'échelle de la parcelle pour évaluer la souplesse d'utilisation des prairies et leurs complémentarités du fait de profil de croissance différents, mais aussi du paysage, le plus souvent sur de petites distances (de l'ordre du kilomètre), pour la pollinisation et la régulation biologique des adventices. Cette combinaison n'a pu être faite ici faute d'avoir géospatialisé l'environnement géographique proche des parcelles étudiées. Les services à la société comme la

régulation du cycle de l'azote nécessitent de renseigner les pratiques mises en œuvre à l'échelle de la parcelle. L'évaluation de la régulation du climat peut être approximée grossièrement par les modèles géospatialisés du type de prairie, mais nous avons montré qu'une évaluation plus précise peut être faite à partir des connaissances sur la composition fonctionnelle de la végétation et des pratiques agricoles.

Article accepté pour publication le 15 janvier 2021

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Beudou J., Martin G., Ryschawy J., (2017). « Cultural and territorial vitality services play a key role in livestock agroecological transition in France », *Agronomy for sustainable development*, 37(4), 36.
- Bohan D. A., Powers S. J., Champion G., Haughton A. J., Hawes C., Squire G., Mertens S. K., (2011). « Modelling rotations: can crop sequences explain arable weed seedbank abundance? », *Weed Research*, 51(4), 422–432.
- Bohan D., Rusch A., Petit-Michaut S., Biju-Duval L., McLaughlin O., (2017). « Régulation des graines d'adventices ». In: Therond, Tichit and Tibi (Coord.), *Volet "écosystèmes agricoles" de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques*, Rapport scientifique, Inra (France), 349-366.
- Carrère P., Seytre L., Landriaux J., Rivière J., Chabalière C., Orth D., (2012). « Une typologie multifonctionnelle des prairies des systèmes laitiers AOP du Massif central combinant des approches agronomiques et écologiques », *Fourrages*, 209, 9-21.
- Cayre P., Michaud A., Theau J. P., Rigolot C., (2018). « The coexistence of multiple worldviews in livestock farming drives agroecological transition. A case study in french Protected Designation of Origin (PDO) cheese mountain areas », *Sustainability*, 10(4), 1097.
- Choler Le buissonnais, (2017). « Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion ». In: Therond, Tichit and Tibi (Coord.), *Volet "écosystèmes agricoles" de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques*, Rapport scientifique, Inra (France), 349-366.
- Dumont B., Puillet L., Martin G., Saviotto D., Aubin J., Ingrand S., Thomas M., (2020). « Incorporating diversity into animal production systems can increase their performance and strengthen their resilience », *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 109.
- Duru M., Vertès F., (2017). « Raisonnement de la fertilisation des prairies », In *Guide de la fertilisation raisonnée du Comifer*, B Colomb (coord.). Edition France Agricole - COMIFER, 377-390.
- Duru M., Therond O., (2018). « La prairie dans tous ses états. I. Une approche multi-niveaux et multi domaines de ses atouts pour l'agriculture et la société ». *Fourrages*, 236, 229-237.
- Duru M., Hossard L., Martin G., Cruz P., (2011a). « Diversité de la composition fonctionnelle de la végétation au sein d'une prairie et entre prairies : caractérisation et analyse dans des élevages herbagers ». *Fourrages*, 205, 61–73.
- 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., Hossard L., Martin G., Theau J. P., (2013). « A methodology for characterization and analysis of plant functional composition in grassland-based farms », *Grass and Forage Science*, 68(2), 216–227.
- Duru M., Theau J. P., Therond O., Cruz P., (2019). « La prairie dans tous ses états : 2- évaluer la production de fourrages et la fourniture de services écosystémiques », *Fourrages*, 240, 295-304.
- 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.
- Martin G., Felten B., Magne M., Piquet M., Sautier M., Theau J., Duru M., (2012). « Le rami fourrager: un support pour la conception de scénarios de

- systèmes fourragers avec des éleveurs et des conseillers », *Fourrages*, 210, 119–128.
- Martin G., Durand J. L., Duru M., Gastal F., Julier B., Litrico I., Novak S., (2020). « Role of ley pastures in tomorrow's cropping systems. A review », *Agronomy for Sustainable Development*, 40, 17.
- Meilhac J., Durand J. L., Beguier V., Litrico I., (2019). « Increasing the benefits of species diversity in multispecies temporary grasslands by increasing within-species diversity », *Annals of botany*, 123 (5), 891-900.
- Michaud A., Plantureux S., Baumont R., Delaby L., (2020). « Les prairies, une richesse et un support d'innovation pour des élevages de ruminants plus durables et acceptables », *INRAE Productions Animales*, 33 (3), 153-172
- Pellerin S., Bamiere L., Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., ... & Cardinael R., (2019). « Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût ? » Synthèse du rapport d'étude, INRAE (France), 117 p.
- Pembleton K. G., Tozer K. N., Edwards G. R., Jacobs J. L., Turner L. R., (2015). « Simple versus diverse pastures: opportunities and challenges in dairy systems », *Animal Production Science*, 55 (7), 893.
- Petit S., Trichard A., Biju-Duval L., *et al.*, (2017). « Interactions between conservation agricultural practice and landscape composition promote weed seed predation by invertebrates », *Agric Ecosyst Environ*, 240, 45–53.
- Rawnsley R. P., Chapman D. F., Jacobs J. L., Garcia S. C., Callow M. N., Edwards G. R., Pembleton K. P., (2013). « Complementary forages - integration at a whole-farm level », *Animal Production Science*, 53, 976–987.
- Rigolot C., Martin G., Dedieu B., (2019). « Renforcer les capacités d'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants : Cadres théoriques, leviers d'action et démarche d'accompagnement » *INRAE Productions Animales*, 32(1), 1-12.
- Rudmann-Maure K., Weyand A., Fischer M., Stöcklin J., (2008). « The role of landuse and natural determinants for grassland vegetation composition in the Swiss Alps », *Basic and Applied Ecology*, 9, 94–503.
- Sautier M., Duru M., Martin Clouaire R., (2013). « Caractérisation de la variabilité climatique en vue de l'adaptation des systèmes fourragers à base d'herbe », *Fourrages*, 215, 201-209.
- Orford K. A., Murray P., 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.
- Theau J. P., Cruz P., Fallour D., Jouany C., Lecloux E., Duru M., (2010). « Une méthode simplifiée de relevé botanique pour une caractérisation agronomique des prairies permanentes », *Fourrages*, 401, 19-25.
- Therond O. (coord.), Tichit M. (coord.), *et al.*, (2017). *Volet "écosystèmes agricoles" de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques*, Rapport scientifique, Inra (France), 966 p.
- Tibi A. et Therond O., (2017). *Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE*, Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 118 p.
- Unkovich M. J., Baldock J., Peoples M. B., (2010). « Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N₂ fixation by crop and pasture legumes », *Plant and Soil*, 329 (1-2), 75-89.
- Zulian G, Maes J, Paracchini M., (2013). « Linking Land Cover Data and Crop Yields for Mapping and Assessment of Pollination Services in Europe », *Land*, 2, 472–492.