



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 Française pour la Production Fourragère

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

www.afpf-asso.org



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 Française pour la Production Fourragère

Quelles typologies pour la prédiction des propriétés des prairies permanentes ?

G. Mesbahi^{1,2}, C. Bayeur¹, A. Michelot-Antalik², S. Plantureux²

Les multiples propriétés des prairies permanentes intéressent de nombreux acteurs, dont les visions divergentes mènent à la création d'outils variés et complémentaires. Nous comparons ici l'intérêt de 3 typologies pour l'estimation de propriétés agronomiques et écologiques des prairies permanentes et la caractérisation de leur milieu.

RÉSUMÉ

Il a été possible de classer 252 prairies permanentes du massif vosgien selon 3 typologies (phytosociologique, agronomique et fonctionnelle). L'étude a comparé les capacités de ces typologies à prédire les propriétés des prairies via l'estimation de 14 propriétés agronomiques et écologiques. Les résultats montrent que la typologie agronomique seule est un bon prédicteur pour plusieurs propriétés (rendement, utilisation, richesse en familles, valeur pollinisateurs et altitude) mais que l'association de 2 ou 3 typologies permet d'améliorer la prédictibilité de certaines autres propriétés (par ex. la richesse floristique, la valeur pastorale ou la fertilité en utilisant les typologies agronomique et phytosociologique).

SUMMARY

Choosing classification systems for predicting the characteristics of permanent grasslands

At the European scale, phytosociological characteristics can be used to identify grasslands that should be preserved. However, phytosociological data do not provide the agronomic information that farmers need. To deal with this issue, an agronomic classification system based on species diversity was developed. Then, functional classification was employed to provide additional information. Our study looked at 252 permanent grasslands in the Vosges mountain range (located in northeastern France). We compared the usefulness of these 3 classification approaches (phytosociological, agronomic, and functional) for predicting the agronomic and ecological characteristics of grasslands and describing their environmental context. The results showed that agronomic classification by itself was the best system for predicting certain grassland characteristics. However, coupling 2 or all 3 classification systems often enhanced prediction quality.

Les prairies permanentes de l'Union Européenne couvrent près de 60 millions d'hectares soit un tiers de sa Surface Agricole Utile (EUROSTAT, 2017). En France, ces prairies produisent près de la moitié des fourrages utilisés par les systèmes d'élevage (AGRESTE, 2017). La surface des prairies permanentes est cependant en régression constante depuis les années 70 en France et en Europe.

Les prairies permanentes ont de nombreuses propriétés agronomiques mais aussi environnementales, telles qu'une forte biodiversité floristique et faunistique ou encore la séquestration de carbone dans le sol (D'OTTAVIO

et al., 2017). Mieux évaluer ces propriétés pourrait permettre d'enrayer le déclin observé des surfaces en prairies. Cependant, cette évaluation peut s'avérer complexe du fait de la diversité des types de prairies, chaque type ayant un profil de propriétés singulier.

Afin de pouvoir plus facilement évaluer les prairies et inciter à leur conservation, des outils tels que les typologies ont été développés. Cependant, les prairies peuvent être classées selon des typologies de nature variée : phytosociologique, agronomique ou fonctionnelle. Ces différentes typologies permettent l'évaluation des propriétés des prairies, mais peuvent mener à des résultats différents.

AUTEURS

1 : Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, F-67290 La Petite Pierre ; geoffrey.mesbahi@gmail.com

2 : Université de Lorraine, Inra, LAE, F-54000 Nancy

MOTS CLÉS : Biodiversité, méthode d'estimation, phytosociologie, prairie permanente, production fourragère, richesse spécifique, services écosystémiques, typologie des prairies, valeur pastorale, végétation, Vosges.

KEY-WORDS : Biodiversity, ecosystem services, estimation method, forage production, grassland typology, pastoral value, permanent pasture, plant sociology, species richness, vegetation, Vosges.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Mesbahi G., Bayeur C., Michelot-Antalik A., Plantureux S. (2019) : «Quelles typologies pour la prédiction des propriétés des prairies permanentes ?», *Fourrages*, 237, 57-65.

L'Union Européenne et la plupart des naturalistes utilisent la phytosociologie pour classer les prairies permanentes et évaluer leur état de conservation. La phytosociologie s'intéresse aux communautés de plantes ; elle est la plus courante des méthodes de classification car elle peut être utilisée à travers le monde dans toutes les conditions environnementales (CHENG *et al.*, 2013 ; RODRÍGUEZ-ROJO *et al.*, 2017 ; 2001 ; SETUBAL et BOLDRINI, 2012). En milieu prairial, un relevé phytosociologique inclut l'inventaire de toutes les espèces botaniques de la strate herbacée et une estimation de recouvrement ou de l'abondance de chaque espèce. Les types, appelés syntaxa, sont principalement construits sur la présence des espèces, et éventuellement sur leur abondance, et suivent des règles de dénomination acceptées par la communauté scientifique (DENGLER *et al.*, 2008). L'objectif premier de la phytosociologie est de décrire les associations de plantes, mais les données obtenues lors des relevés botaniques peuvent permettre d'estimer des valeurs agronomiques (par ex. la valeur pastorale), les pressions environnementales et les pratiques agricoles (BECU *et al.*, 2017).

De leur côté, les agronomes ont développé des typologies permettant d'estimer les rendements et la qualité des fourrages, et de comprendre l'impact des pratiques agricoles (JEANNIN *et al.*, 1991 ; MICHAUD *et al.*, 2013 ; PLAN-TUREUX *et al.*, 1993). Ces typologies sont généralement construites sur l'abondance des principales espèces botaniques afin d'estimer au mieux le fourrage ingéré par les animaux. Certaines typologies prennent en compte l'ensemble des espèces de la prairie, notamment pour leurs valeurs de diagnostic de l'état du milieu. Pour associer rendement, qualité fourragère et gestion des prairies, des enquêtes auprès des agriculteurs et des analyses fourragères en laboratoire sont réalisées. Les typologies agronomiques les plus récentes (BAYEUR *et al.*, 2013 ; CARRÈRE *et al.*, 2012 ; LAUNAY *et al.*, 2011) visent également à prédire des propriétés environnementales (biodiversité, séquestration de carbone...), économiques (coût de production du fourrage) ou relatives à la qualité des produits (valeur aromatique). Elles intègrent même des dimensions phytosociologiques (CARRÈRE *et al.*, 2012) et fonctionnelles (CARRÈRE *et al.*, 2012 ; LAUNAY *et al.*, 2011).

L'écologie fonctionnelle propose de caractériser la diversité floristique en se basant sur la mesure des traits fonctionnels (LAVOREL et GARNIER, 2002 ; VIOLLE *et al.*, 2007). Les traits fonctionnels sont des caractéristiques morphologiques, physiologiques ou phénologique, mesurables sur un individu, et qui influencent sa survie (VIOLLE *et al.*, 2007). Les agronomes ont appliqué ces connaissances aux prairies permanentes pour développer de nouvelles classifications, basées sur la stratégie d'acquisition des ressources ou la phénologie des espèces prairiales. Les graminées (CRUZ *et al.*, 2010 ; DURANTE *et al.*, 2012) puis les espèces non graminéennes (THEAU *et al.*, 2017) ont ainsi été classées en regroupant plusieurs traits pour définir des « types fonctionnels » de plantes. Chaque type fonctionnel a pour objectif de refléter et prédire les propriétés de la prairie telles que la productivité, la qualité fourragère, la précocité et la souplesse d'exploitation.

Typologies phytosociologiques, agronomiques et fonctionnelles visent donc des objectifs différents mais qui se rejoignent parfois. Les décideurs (agriculteurs, conseillers agronomiques, écologues, élus...) ont besoin de connaître les propriétés agronomiques et écologiques des prairies permanentes et de leur milieu, **mais très peu d'études s'intéressent à comparer l'intérêt de ces différentes typologies.** Pourtant, les études de CARRÈRE *et al.* (2012) et LECONTE *et al.* (2008) mettent en valeur des avantages à l'association de typologies différentes, pour une meilleure estimation de la ration alimentaire ou pour comprendre l'évolution de prairies soumises à un changement de pratiques agricoles ou d'environnement. Cependant, l'avantage de l'association de typologies n'a jamais été rigoureusement évalué.

Dans cet article, nous nous intéressons aux propriétés agronomiques et écologiques des prairies permanentes et à la caractérisation du milieu, définies par quatorze propriétés. Ces dernières ont été sélectionnées afin de recouvrir une diversité de propriétés agronomiques et écologiques, tout en étant disponibles dans les bases de données existantes. **L'objectif est d'analyser la capacité des typologies phytosociologique, agronomique et fonctionnelle à prédire les propriétés sélectionnées. Nous y étudions aussi l'intérêt de l'association de deux ou trois typologies pour l'estimation de ces mêmes propriétés.**

1. Matériel et méthodes

■ Description du jeu de données

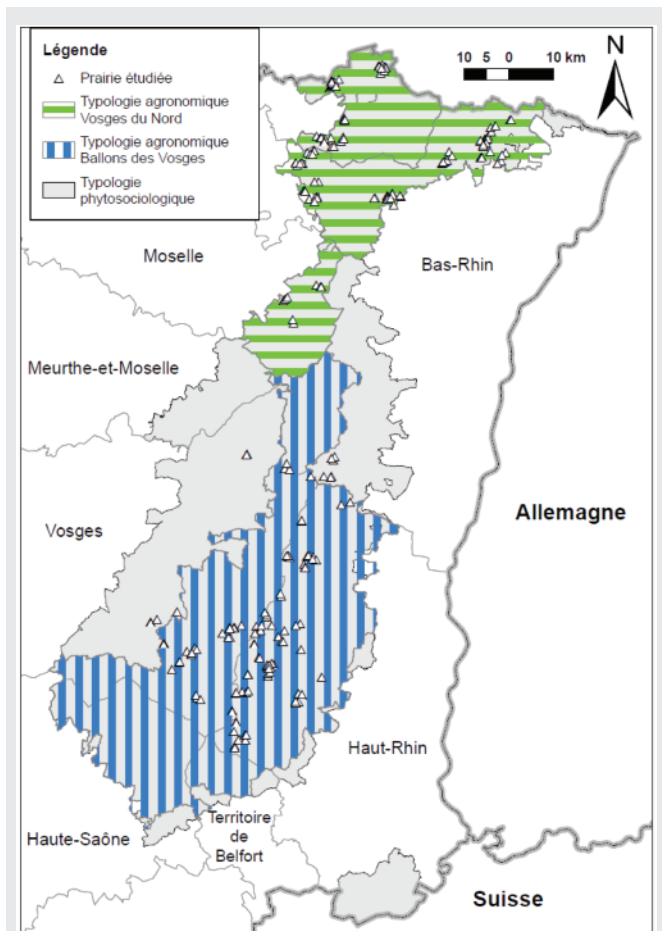
Notre jeu de données est constitué de l'ensemble des **252 prairies permanentes issues de trois études agronomiques** : la typologie des prairies permanentes des Ballons des Vosges (COLLECTIF, 2006), la typologie des prairies permanentes des Vosges du Nord et Vosges Mosellanes (BAYEUR *et al.*, 2013) et la typologie nationale des prairies permanentes (LAUNAY *et al.*, 2011) (figure 1).

Toutes les prairies sont localisées **dans le massif vosgien**, s'étendant sur une superficie de 7 000 km² environ au nord-est de la France. L'altitude varie de 170 à 1 424 m et la roche mère est composée de calcaire et de grès au nord, et de granite dans la partie sud. Le climat y est semi-continentale plus ou moins sous influence océanique ou polaire, selon de complexes gradients de longitude, latitude et altitude (FERREZ *et al.*, 2017).

■ Attribution des types

Pour pouvoir attribuer un type phytosociologique, un type agronomique et un type fonctionnel à chacune des 252 prairies, un travail préliminaire a dû être effectué.

Types phytosociologiques : La typologie phytosociologique des milieux ouverts du massif des Vosges a été élaborée par les Conservatoires botaniques (Conservatoire botanique d'Alsace, Conservatoire botanique national de Franche-Comté, Pôle lorrain du futur Conservatoire Botanique National Nord-Est), sur une base de 1 628 relevés



Les 252 prairies étudiées ont été sélectionnées afin de couvrir la diversité des sols, des altitudes, mais aussi des pratiques agricoles. Une typologie ne peut être utilisée en dehors de sa zone de validité : la typologie agronomique des Vosges du Nord s'applique aux prairies permanentes du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord et des Vosges Mosellanes ; celle des Ballons des Vosges s'applique aux prairies permanentes du Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges et à deux Communautés de Communes mitoyennes. Enfin, la typologie phytosociologique est utilisable sur tout le massif vosgien et le Jura alsacien.

FIGURE 1 : Localisation des prairies étudiées et zones de validité des 3 typologies (agronomiques et phytosociologique) du massif vosgien utilisées.

FIGURE 1 : Location of the grasslands studied and the parts of the Vosges mountain range in which the 3 classification systems (phytosociological and agronomic) were used.

réalisés de 1993 à 2015 sur tout le massif vosgien (encart 1, figure 1). Au total, 65 types phytosociologiques ont été identifiés mais seuls 25 ont été retenus pour notre étude : ce sont, à dire d'expert (Conservatoires Botaniques), les types les plus présents dans les exploitations agricoles du massif.

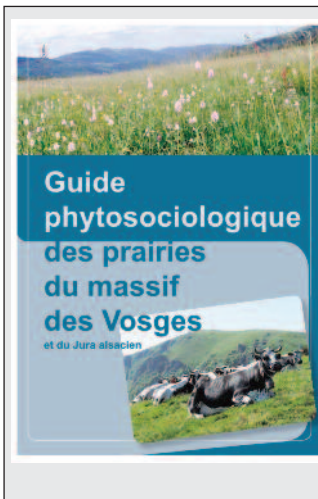
La détermination des types phytosociologiques des 252 prairies de notre étude a été réalisée *a posteriori*, à partir de relevés botaniques complets. La clé de détermination des types nécessite une forte expertise botanique mais aussi des informations non disponibles sur la base de données (par ex. : hauteur de végétation). Nous avons donc développé une clé de détermination simplifiée des types, qui repose sur la connaissance de 48 genres botaniques. Cette simplification limite grandement le temps et les erreurs liées à l'identification des espèces botaniques. Cette clé a été vérifiée sur le terrain (31 prairies) et sur la base de données (252 prairies) ; nous avons observé que plus de 81% des prairies étaient correctement classées.

Types agronomiques : Deux typologies agronomiques ont été développées pour les prairies permanentes du massif vosgien : la première pour les prairies des Vosges granitiques de la zone du PNR (Parc Naturel Régional) des Ballons des Vosges (COLLECTIF, 2006) ; la seconde pour les prairies des Vosges gréseuses et calcaires du PNR des Vosges du Nord et Vosges Mosellanes (BAYEUR *et al.*, 2013) (figure 1). Nous n'avons pas observé de types redondants entre les deux typologies car les prairies décrites par ces typologies sont très différentes en termes de flore et de conditions naturelles. N'observant pas de types à fusionner, nous avons donc pu rassembler ces deux typologies en une seule, que nous appellerons « typologie agronomique » dans cet article. Vingt-cinq types agronomiques sont ainsi décrits sur le massif vosgien.

Types fonctionnels : CRUZ *et al.* (2010) ont attribué six types (A, B, b, C, D et E) à 38 des graminées françaises les plus communes. Ces types sont construits sur des traits fonctionnels des feuilles (teneur en matière sèche, surface spécifique foliaire, durée de vie et résistance à la cassure) et de la plante (date de floraison et hauteur maximale). Nous avons associé un type fonctionnel à chaque prairie selon la méthodologie proposée par CRUZ *et al.* (2010). Si les

ENCART 1 : Guide phytosociologique des prairies du massif des Vosges et du Jura alsacien (par François Vernier).

SIDEBAR 1 : Phytosociological guide to the grasslands of the Vosges and northern Jura mountain ranges (by François Vernier).



Ce travail commencé en 2013 a été l'occasion d'une collaboration entre les 3 entités conservatoires couvrant le massif vosgien (Conservatoire Botanique National de Franche-Comté, Conservatoire Botanique d'Alsace et Pôle lorrain du futur Conservatoire Botanique National du Nord-Est) et du Parc Naturel Régional des Ballons des Vosges en tant que coordinateur, en lien avec celui des Vosges du Nord.

Il a fait l'objet de la publication du *Guide phytosociologique des prairies du massif des Vosges et du Jura alsacien* en mai 2017 (FERREZ *et al.*, 2017).

Les prairies vosgiennes constituent un patrimoine naturel très riche : 65 groupements végétaux y ont été identifiés, comportant 700 espèces soit environ la moitié des taxons existant sur l'ensemble du massif. Parmi ces espèces, 50 sont protégées et 150 inscrites sur les listes rouges régionales.

Ce travail ne se limite pas à une description et à une classification des habitats rencontrés. Une analyse de la dynamique de ces milieux et des pratiques agricoles permet d'orienter les gestionnaires pour améliorer sur le long terme la préservation de ces groupements.

graminées d'un type représentent plus de 60% des graminées de la prairie, alors ce type est attribué à la prairie (ex. : une prairie composée de 76% de graminées de type A, 3% de B et 21% de C sera de type A). Sinon, la prairie est nommée selon tous les types présents à plus de 20%, par ordre décroissant (ex. : une prairie composée de 28% de A, 32% de B, 10% de b et 30% de C sera de type BCA).

Association de typologies : Pour pouvoir étudier l'effet prédictif des associations de typologies, nous avons associé les types de chaque prairie. Chaque prairie a donc été caractérisée par ses types individuellement, mais aussi par l'association de ses types. Les types sont associés par paire (phytosociologique et agronomique, phytosociologique et fonctionnel, et agronomique et fonctionnel) et par trio (phytosociologique, agronomique et fonctionnel). Par exemple, une seule et même prairie est associée au type phytosociologique Phy_06, au type agronomique BV_03 et au type fonctionnel C. Cette prairie est donc aussi associée à la combinaison des types phytosociologique et agronomique Phy_06+BV_03, à la combinaison des types phytosociologique et fonctionnel Phy_06+C, à la combinaison des types agronomique et fonctionnel BV_03+C et enfin à la combinaison des trois types Phy_06+BV_03+C.

■ Constitution de la base de données

Lors de l'élaboration des typologies agronomiques, en 2006 et 2013, des types agronomiques ont été attribués à chaque prairie. Ces mêmes années, des entretiens avec les

agriculteurs ont permis de connaître leurs pratiques agricoles et rendements, et des relevés botaniques exhaustifs ont été réalisés. Les relevés botaniques comportent une estimation des pourcentages de recouvrement de chaque espèce à l'échelle de la principale station botanique homogène. Ces relevés ont été réalisés par un inventaire exhaustif des espèces et une estimation de leur contribution à la biomasse par la méthode des poignées. Nous avons attribué les types phytosociologiques et fonctionnels grâce à ces relevés, selon les méthodes décrites dans les paragraphes précédents.

Les 14 propriétés identifiées et les métriques permettant de les estimer sont présentées dans le tableau 1. Pour les **7 propriétés écologiques**, nous considérons la richesse en espèces botaniques vasculaires, en espèces oligotrophiles et en familles botaniques, la valeur pour les pollinisateurs, la richesse et moyenne pondérée de la profondeur d'enracinement selon les indices d'ELLENBERG (ELLENBERG *et al.*, 1992) et l'abondance des formes de vie. Pour les **4 propriétés agronomiques** nous évaluons le rendement, la valeur pastorale, le mode d'utilisation et la précocité. De plus, nous avons testé la capacité des typologies à prendre en compte **3 propriétés caractérisant le milieu** : l'humidité et la fertilité du sol estimées à partir des indices d'ELLENBERG (ELLENBERG *et al.*, 1992) et l'altitude.

Nous avons utilisé le site Internet e-FLORA-sys (PLANTUREUX et AMIAUD, 2009) pour calculer la richesse en espèces oligotrophiles et en familles botaniques, le nombre de familles botaniques, la valeur pastorale et les

Propriété	Source*	Méthode d'estimation
Propriétés écologiques		
Richesse en espèces botaniques vasculaires	Calculée	Nombre d'espèces floristiques observées dans la prairie
Richesse en espèces oligotrophiles	Calculée par e-FLORA-sys	Nombre d'espèces floristiques observées dans la prairie et ayant un indice de fertilité d'ELLENBERG < 3
Richesse en familles botaniques	Calculée par e-FLORA-sys	Nombre de familles botaniques observées dans la prairie
Valeur pollinisateurs	Calculée	Contribution à la biomasse (%) des espèces végétales entomophiles de la prairie
Richesse des indices de profondeur d'enracinement	Calculée par e-FLORA-sys	Nombre d'indices de profondeurs d'enracinement d'ELLENBERG observés sur la prairie
Moyenne des indices de profondeur d'enracinement	Calculée	Moyenne des indices de profondeur d'enracinement d'ELLENBERG observés sur la prairie, pondérée par l'abondance de chaque espèce
Abondance des formes de vie	Calculée par e-FLORA-sys	Abondance (%) de chaque forme de vie pour chaque prairie : les herbacées (<i>Cyperaceae</i> , <i>Juncaceae</i> , <i>Liliaceae</i> , <i>Poaceae</i>), les légumineuses, les rosettes et les diverses
Propriétés du milieu		
Humidité	Calculée par e-FLORA-sys	Moyenne des indices d'humidité d'ELLENBERG observés sur la prairie, pondérée par l'abondance de chaque espèce
Fertilité du sol	Calculée par e-FLORA-sys	Moyenne des indices de fertilité d'ELLENBERG observés sur la prairie, pondérée par l'abondance de chaque espèce
Altitude	Collectée par SIG	Altitude moyenne de la prairie
Propriétés agronomiques		
Rendement	Calculé	Estimé selon le nombre de bottes et le chargement des pâtures**
Valeur pastorale	Calculée par e-FLORA-sys	Moyenne des valeurs pastorales de chaque espèce, pondérée par l'abondance des espèces. Pour chaque espèce, la valeur pastorale est estimée selon le rendement potentiel, la valeur nutritive, l'appétence et la digestibilité.
Utilisation	Enquêtes	Pâturage, Fauche ou Mixte, pour chaque prairie
Précocité	Calculée	Contribution à la production (%) des espèces précoces, moyennes ou tardives, selon CRUZ <i>et al.</i> (2010) et THEAU <i>et al.</i> (2017) (3 variables)

* Ces 14 propriétés ont été obtenues par calculs ou par enquêtes et s'appliquent à l'échelle de la prairie.

** Herbe consommée au pâturage (t MS/ha/an) estimée à partir du nombre jours UGB/ha/an x UGB x 13,7 kg MS/j/UGB (après déduction éventuelle des apports du fourrage au pâturage). Herbe récoltée (t MS/ha/an) estimée à partir du poids brut des bottes de foin x 85% (teneur en MS) x nombre de bottes/ha/an

TABLEAU 1 : Source et méthode d'obtention des 14 propriétés prairiales étudiées.

TABLE 1 : Source and basis for the 14 grassland characteristics that were studied.

indices d'Ellenberg pour l'humidité, la fertilité du sol et la profondeur d'enracinement.

■ Analyses statistiques

Nous avons réalisé des « **sélections de modèles** ». L'objectif est de comprendre quelle typologie, ou quelle combinaison de typologies, permet d'estimer au mieux chacune des 14 propriétés étudiées. Pour ce faire, chaque propriété a été modélisée par une, deux puis trois typologies, puis nous avons sélectionné le meilleur modèle pour chaque propriété.

Cependant, la création de modèles doit répondre à certaines règles dépendantes des propriétés à modéliser. Pour respecter ces règles, nous avons appliqué des modèles linéaires aux propriétés ayant une distribution normale, et des modèles linéaires généralisés aux propriétés ayant une distribution non normale. La propriété « utilisation » étant une variable qualitative, nous l'avons modélisée grâce à des modèles logit multinomiaux. Enfin, un modèle constant (dit « nul ») a été ajouté pour chaque propriété : il permet de vérifier la qualité du meilleur modèle (BURNHAM et ANDERSON, 2002).

Les modèles de chaque propriété se voient attribuer un poids, qui représente la probabilité que ce modèle soit le meilleur. Ainsi, pour chaque propriété, la somme des poids est égale à 1. Le modèle ayant le poids le plus élevé est le meilleur, mais si plusieurs modèles ont des poids similaires, on ne peut pas affirmer qu'un modèle est meilleur que les autres.

Enfin, nous obtenons les coefficients de détermination du meilleur modèle de chaque propriété : R^2 (pour les modèles linéaires) et pseudo- R^2 (pour les modèles linéaires généralisés et les modèles logit multinomiaux). Ce coefficient, compris entre 0 et 1, permet d'observer la capacité de chaque meilleur modèle à bien prédire la propriété étudiée : plus il est élevé, meilleur est le modèle.

Les analyses ont été réalisées grâce au logiciel R et aux packages car, mlogit, MuMIn et qpcR.

2. Résultats

■ Attribution des types

Nous avons attribué un type phytosociologique, un type agronomique et un type fonctionnel à chacune des 252 prairies étudiées. Nous avons ainsi identifié 17 types phytosociologiques sur les 25 sélectionnés par les Conservatoires Botaniques, ainsi que les 25 types agronomiques décrits sur le massif vosgien. Enfin, nous avons identifié 33 types fonctionnels (tableau 2).

L'association des typologies agronomiques et phytosociologiques résulte en 116 croisements différents de types (par ex. : croisement du type agronomique BV_01 avec le type phytosociologique Phy_05, pour la même prairie). De même, nous avons observé 148 croisements entre les typologies agronomique et fonctionnelle, 109 croisements entre

Types* phytosociologiques		Types agronomiques				Types fonctionnels			
Phy_01	24	BV_01	17	VN_01	8	A	40	bBC	1
Phy_02	22	BV_02	24	VN_02	8	AB	18	bC	1
Phy_04	8	BV_03	10	VN_03	6	Ab	13	bCB	1
Phy_05	26	BV_04	10	VN_04	4	AbB	2	C	41
Phy_06	8	BV_05	5	VN_05	9	ABb	5	CA	28
Phy_07	14	BV_06	12	VN_06	8	ABC	3	CAB	2
Phy_08	8	BV_07	11	VN_07	13	AC	34	CAb	1
Phy_09	12	BV_08	11	VN_08	9	ACB	4	CB	3
Phy_11	20	BV_09	10	VN_09	14	AEC	1	Cb	5
Phy_12	61	BV_10	13	VN_10	5	B	10	CbA	2
Phy_16	6	BV_11	6	VN_11	6	BA	9	CbD	1
Phy_18	5	N/A*	2	VN_12	11	Bb	5	CBA	3
Phy_20	20			VN_13	11	BC	3	CD	6
Phy_25	9			VN_14	9	BCA	2	DC	3
Phy_29	3					b	1	E	1
Phy_30	3					bA	1		
Phy_31	3					bB	2		
Total	252								252

* Répartition des 252 prairies au sein des 17 types phytosociologiques, 25 types agronomiques et 32 types fonctionnels. N/A : informations insuffisantes pour identifier le type agronomique de 2 prairies

TABLEAU 2 : Répartition des 252 prairies du massif vosgien étudiées, en fonction des 3 typologies.

TABLE 2 : Classification of the 252 grasslands in the Vosges mountain range using the 3 systems.

les typologies phytosociologique et fonctionnelle et enfin 207 croisements entre les trois typologies.

■ Sélections de modèles

Nous avons réalisé une sélection de modèles pour chacune des propriétés (tableau 3).

Cinq propriétés sont prédites au mieux par une seule typologie : la typologie agronomique. Ces propriétés sont diverses : rendement, utilisation, altitude, richesse en familles botaniques, «valeur pollinisateurs».

L'association de 2 typologies permet d'améliorer la prédiction de 5 propriétés. L'association des typologies agronomique et phytosociologique permet la prédiction de quatre propriétés (richesse en espèces oligotrophiles, humidité et fertilité du sol et valeur pastorale). L'association des typologies agronomique et fonctionnelle permet la prédiction de la moyenne des indices du système racinaire.

L'association des 3 typologies permet la meilleure prédiction de 2 propriétés : l'abondance des formes de vie et la précocité de la végétation.

Nous n'avons cependant pas pu identifier un modèle meilleur que les autres pour prédire la richesse spécifique. Le modèle avec le poids le plus fort est construit sur l'association des typologies agronomiques et phytosociologiques, mais il est suivi par un modèle basé uniquement sur la typologie agronomique (ces modèles ont des poids respectifs de 0,654 et 0,236 : ces poids ne sont pas suffisamment différents pour affirmer qu'un modèle est meilleur que l'autre).

Enfin, seule une propriété n'a pas pu être expliquée par l'une des typologies : la richesse des indices de profondeur d'enracinement. En effet, le meilleur modèle prédictif de cette propriété est le modèle nul.

Variable	Meilleur modèle	Poids du meilleur modèle	Poids du modèle nul	Qualité du meilleur modèle
Propriétés écologiques				
Richesse en espèces botaniques vasculaires	A + P*	0,654	0	R ² = 0,34
Richesse en espèces oligotrophiles	A + P	0,955	0	R ² = 0,64
Richesse en familles botaniques	A	0,998	0	R ² = 0,39
Valeur pollinisateurs	A	0,952	0	pseudo-R ² = 0,26
Richesse des indices de profondeur d'enracinement	Nul	0,992	0,992	pseudo-R ² = 0
Moyenne des indices de profondeur d'enracinement	A + F	0,971	0	pseudo-R ² = 0,53
Abondance des formes de vie	A + P + F	1	0	pseudo-R ² = 0,84
Propriétés du milieu				
Humidité	A + P	0,991	0	pseudo-R ² = 0,68
Fertilité du sol	A + P	1	0	pseudo-R ² = 0,75
Altitude	A	1	0	pseudo-R ² = 0,89
Propriétés agronomiques				
Rendement	A	0,997	0	pseudo-R ² = 0,52
Valeur pastorale	A + P	0,984	0	pseudo-R ² = 0,59
Utilisation	A	1	0	pseudo-R ² = 0,72
Précocité	A + P + F	1	0	pseudo-R ² = 0,70

* typologies A : agronomique, P : phytosociologique, F : fonctionnelle. Chaque propriété a été modélisée par les typologies seules ou combinées et enfin par un modèle nul. Le meilleur modèle est celui dont le poids est le plus élevé. Le poids du meilleur modèle doit être comparé au poids du modèle nul afin de s'assurer que le meilleur modèle est supérieur à un modèle constant. Enfin, nous vérifions la qualité du meilleur modèle en observant son R² ou pseudo-R²

TABLEAU 3 : Sélection des meilleures typologies et combinaisons de typologies pour la prédiction de 14 propriétés prairiales.

TABLE 3 : Best individual and combined classification systems for predicting the 14 grassland characteristics.

3. Discussion

Cette étude vise à répondre à deux questions :

- quelle typologie permet le mieux de prédire les propriétés agronomiques et écologiques des prairies ?
- l'association de plusieurs typologies permet-elle d'améliorer cette prédiction ?

CARRÈRE *et al.* (2012) ont montré qu'il était possible de prédire les propriétés en combinant les typologies. Nous avons cherché à savoir si la combinaison de typologies apporte un avantage à l'utilisation d'une seule typologie. Ces résultats pourront ainsi à l'avenir permettre le développement de typologies estimant les propriétés nécessaires à la fois aux agronomes et aux écologues.

■ Limites de la méthode

L'analyse statistique que nous avons choisie ne crée pas le meilleur modèle possible, mais elle choisit le meilleur parmi les modèles que nous proposons. Ainsi, si nous ne proposons que des modèles de faible qualité, même le meilleur modèle sera de faible qualité. Cet argument peut expliquer les faibles qualités des modélisations de la richesse des indices d'enracinement du système racinaire et, dans une moindre mesure, de la valeur pollinisateurs et la richesse en espèces botaniques vasculaires. De même, les typologies non retenues par la sélection de modèle ne sont pas forcément mauvaises : elles peuvent être efficaces, mais moins que le meilleur modèle.

Pour vérifier la qualité des modèles sélectionnés, nous utilisons le coefficient de détermination (R² et le pseudo-R²) mais l'intérêt de cet indice peut être débattu (HOETKER, 2007). Ces coefficients de détermination peuvent être utilisés comme vérification, mais le plus important est la comparaison entre les poids du meilleur modèle et du modèle nul pour chaque propriété. Parmi nos résultats, les meilleurs modèles ont très souvent des poids proches de 1 et des poids très supérieurs aux poids

des modèles nul associés. Ceci montre que, même si les coefficients de détermination sont parfois faibles, nous avons pu grandement améliorer les connaissances sur la prédictibilité des propriétés par les typologies prairiales.

De plus, notre étude ne peut s'intéresser à toutes les typologies existantes. L'utilisation de la typologie nationale des prairies permanentes classant les prairies selon d'autres critères (LAUNAY *et al.*, 2011) ou de typologies des exploitations agricoles spécialisée dans l'estimation de la valeur environnementale (SULLIVAN *et al.*, 2017) pourrait peut-être améliorer les capacités de prédiction des propriétés étudiées.

■ Les propriétés les mieux prédites par la typologie agronomique uniquement

L'utilisation (pâturage/fauche/mixte) et **l'altitude** sont prises en compte pour différencier les types au sein des typologies agronomiques. De plus, les typologies agronomiques ont principalement été construites pour estimer **le rendement** des prairies permanentes. On pouvait donc s'attendre à ce que ces trois propriétés soient bien expliquées par la typologie agronomique, ce qui est vérifié grâce à des poids et pseudo-R² élevés.

La littérature indique que l'utilisation (BONARI *et al.*, 2017) et l'altitude (KOPEĆ *et al.*, 2010) impactent la diversité floristique, ce qui se traduit par des types phytosociologiques différents (FERREZ *et al.*, 2017). Cependant, nos résultats montrent que ces types phytosociologiques discriminent moins bien utilisation et altitude que les types agronomiques. Ces résultats peuvent paraître cohérents pour l'utilisation mais moins pour l'altitude. Ils s'expliquent par le fait que les types phytosociologiques présents dans le massif vosgien recouvrent un gradient altitudinal intra-type assez important (résultats non présentés).

La valeur pollinisateurs est calculée grâce à la contribution à la biomasse des espèces floristiques entomophiles (par ex. : trèfles, pissenlits, knauties...). La typologie agro-

nomique est la meilleure pour prédire la valeur pollinisateurs. Ce résultat peut être dû à des différences méthodologiques entre typologies agronomique et phytosociologique. La typologie agronomique semble mieux discriminer les prairies selon la contribution à la biomasse des espèces à fleurs (le critère pris en compte dans le calcul de la valeur pollinisateurs), alors que la typologie phytosociologique semble mieux discriminer les prairies selon la nature des espèces présentes. Ainsi, la typologie phytosociologique pourrait être plus prédictive de la diversité des espèces d'insectes pollinisateurs, fortement liée à la diversité floristique (HEGLAND et TOTLAND, 2005 ; WARZECHA *et al.*, 2017).

Par ailleurs, la valeur pollinisateurs pourrait être mieux estimée en prenant aussi en compte les dates d'utilisation (BAYEUR *et al.*, 2013) et en pondérant la valeur pollinisateurs des espèces entomophiles en fonction de leur attrait pour les pollinisateurs (RICOU *et al.*, 2014).

■ Les propriétés prédites par l'association des typologies agronomique et phytosociologique

L'association des typologies agronomique et phytosociologique permet la meilleure prédiction de la richesse en espèces oligotrophiles, de l'humidité et de la fertilité du sol et de la valeur pastorale.

Dans cette étude, nous avons identifié les espèces oligotrophiles grâce à leur indice de fertilité d'ELLENBERG (ELLENBERG *et al.*, 1992). Le calcul de la moyenne des indices des espèces présentes a permis d'estimer la fertilité du sol de la prairie. Cette méthodologie peut expliquer pourquoi **la richesse en espèces oligotrophiles et la fertilité du sol** sont toutes deux estimées au mieux par le même modèle. L'impact de la fertilité du sol sur la flore est déjà bien documenté, de même que la corrélation entre un indice de fertilité élevé et une faible diversité d'espèce oligotrophiles (SULLIVAN *et al.*, 2010). Ces liens peuvent expliquer pourquoi ces deux propriétés sont bien modélisées par l'association des typologies agronomique et phytosociologique. Nous supposons par ailleurs une complémentarité entre ces deux typologies : la typologie agronomique discrimine probablement mieux les prairies tout au long du gradient de fertilité, tandis que la typologie phytosociologique révèle des différences entre d'une part de très faibles niveaux de fertilité (pelouses) et d'autre part les niveaux plus élevés (prairies). Cependant, la typologie fonctionnelle devrait aussi discriminer les sols fertiles des sols pauvres : les types A, B et b sont typiques des sols fertiles alors que les types C et D sont liés aux sols pauvres (CRUZ *et al.*, 2010). Il est donc surprenant de ne pas voir la typologie fonctionnelle comme base du modèle prédictif de la fertilité du sol. Cette absence peut être due à deux critères en particulier. Premièrement, la typologie fonctionnelle est uniquement construite sur les graminées alors que les prairies ont une flore variée ; les types identifiés ne sont donc peut-être pas assez représentatifs de la végétation totale. Deuxièmement, un grand nombre de types fonctionnels ne comportent que peu d'individus : 20 types ont moins de cinq prairies, dont 9 types n'ayant qu'une prairie (tableau 2), cette hétérogénéité de répartition plus forte des types fonctionnels peut diminuer la puissance des modèles statistiques.

néité de répartition plus forte des types fonctionnels peut diminuer la puissance des modèles statistiques.

L'humidité du sol impacte la composition botanique d'une prairie, mais aussi les pratiques agricoles. De plus, l'humidité du sol est une composante importante des typologies agronomique et phytosociologique. A l'inverse, la typologie fonctionnelle se concentre sur les graminées uniquement, ce qui peut la rendre moins sensible aux variations d'humidité et expliquer l'exclusion de cette typologie du meilleur modèle prédictif. Par ailleurs, humidité et fertilité du sol sont modélisées par les mêmes typologies. Des liens entre ces propriétés ont été montrés : dans les prairies non-inondables, l'humidité augmente la minéralisation de l'azote, ce qui augmente la fertilité du sol (CASSMAN et MUNNS, 1980 ; HARRIS *et al.*, 2017). A l'inverse, la production des prairies sèches est limitée par l'humidité et non la nutrition : les agriculteurs ont donc tendance à moins fertiliser ces prairies et donc à ne pas augmenter artificiellement la fertilité. Les prairies sèches ont ainsi tendance à être des prairies pauvres.

Enfin, **la valeur pastorale** est aussi estimée au mieux par l'association des typologies agronomique et phytosociologique. La valeur pastorale de chaque espèce dépend de son rendement potentiel, sa valeur nutritive, son appétence et sa digestibilité. Nous montrons dans cette étude que le rendement est estimé au mieux par la typologie agronomique seule, mais nous n'avons malheureusement pas les données suffisantes pour modéliser chaque composante de la valeur pastorale. Par ailleurs, il est établi que la fertilité du sol augmente la qualité du fourrage directement (en augmentant le taux de protéine) et indirectement (en modifiant la flore) (SCHELLBERG, 1999). Ce lien entre fertilité et qualité conforte nos résultats montrant que fertilité et valeur pastorale sont toutes deux modélisées sur une base similaire, l'association des typologies agronomiques et phytosociologiques.

Le modèle de **la richesse totale** ayant le poids le plus élevé est aussi basé sur l'association des typologies agronomique et phytosociologique. Cependant, le poids de ce modèle (0,654) ne permet pas d'affirmer que ce modèle est meilleur que le second modèle basé uniquement sur l'agronomie et d'un poids de 0,236. Ce résultat montre qu'il est difficile d'estimer correctement la richesse totale avec les typologies étudiées, d'autant plus que le R^2 du modèle basé sur l'association des typologies agronomique et phytosociologique est assez faible (0,34). Le critère de richesse en espèces, s'il est très utilisé, n'est pas le plus intéressant pour évaluer la biodiversité (LE ROUX *et al.*, 2008 ; MAUCHAMP *et al.*, 2014). C'est pourquoi l'évaluation de la richesse totale est de plus en plus délaissée au profit d'indices de diversité tels que les indices de Rao ou de Simpson (BELLO *et al.*, 2010 ; MAUCHAMP *et al.*, 2014).

■ Les propriétés prédites par les typologies agronomique et fonctionnelle

Nous n'avons pas réussi à trouver de bon modèle pour la richesse des indices de profondeur d'enracinement, qui est mieux estimée par le modèle nul. Ce résultat signifie

que **la richesse des systèmes racinaires est totalement indépendante des typologies**. Cependant, l'association des typologies agronomique et fonctionnelle prédit au mieux la **moyenne des indices de profondeur d'enracinement**. Ce résultat est similaire à l'étude de ORAM *et al.* (2018), qui a montré que la moyenne des profondeurs du système racinaire a plus d'impact que la diversité des systèmes racinaires sur la biomasse racinaire. Par ailleurs, aucune information sur le système racinaire n'apparaît dans les typologies agronomique (BAYEUR *et al.*, 2013 ; COLLECTIF, 2006) et fonctionnelle (CRUZ *et al.*, 2010). Ce résultat met donc en évidence un nouveau potentiel de prédiction du système racinaire, grâce à l'association de deux typologies prairiales existantes.

■ Les propriétés prédites par l'association des trois typologies

L'association des trois typologies permet de prédire au mieux l'abondance des formes de vie et la précocité de la végétation.

L'abondance des formes de vie (herbes, légumineuses, rosettes et diverses) est prédite au mieux par l'association des trois typologies. Il est intéressant de pouvoir prédire cette propriété car aucune des 3 typologies utilisées n'a été construite sur la base des formes de vie, ni pour les prédire. Ce résultat est d'autant plus intéressant que le poids du meilleur modèle et le pseudo-R² sont forts, respectivement 1 et 0,84. Nous pouvons observer dans notre jeu de données que les milieux fertiles sont propices aux herbes et défavorables aux diverses, conformément à la littérature (KIDD *et al.*, 2017). Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que chaque typologie est importante pour la prédiction de cette variable : la typologie fonctionnelle permet la description des graminées (composante majeure des « herbes ») ; la typologie agronomique permet une bonne évaluation en milieux fertiles, à l'inverse de la typologie phytosociologique plutôt centrée sur les milieux peu fertiles.

La typologie fonctionnelle est en partie construite sur **la précocité de la végétation** (CRUZ *et al.*, 2010). Cependant, cette classification a un pouvoir de prédiction bien inférieur à l'association des trois typologies. En effet, les typologies agronomique et phytosociologique peuvent permettre la prise en compte de la flore non graminéenne, ou de contraintes agronomiques et environnementales liées à la précocité de la végétation. Bien que les résultats de notre étude soient très encourageants, avec un poids et un pseudo-R² élevés, la construction d'une nouvelle typologie fonctionnelle basée sur l'association de la typologie fonctionnelle des espèces graminéennes (CRUZ *et al.*, 2010) et sur une typologie fonctionnelle des dicotylédones (THEAU *et al.*, 2017) pourrait probablement améliorer l'estimation de la précocité de la végétation prairiale, mais aussi la prédictibilité d'autres propriétés.

Conclusion

Cette étude est, à notre connaissance, le premier travail de comparaison quantitative sur un même ensemble de prairies des capacités prédictives des typologies phytosociologique, agronomique et fonctionnelle. Nous avons montré que la typologie agronomique permet non seulement la meilleure prédiction du rendement, mais également la prédiction de propriétés écologiques. Cependant, dans la majorité des cas, l'association de plusieurs typologies permet d'améliorer la prédictibilité des propriétés. Dans le cadre de cette étude, les typologies phytosociologique et fonctionnelle considérées seules n'ont pas permis de maximiser la prédiction des propriétés sélectionnées. La généralisation des résultats nécessitera de l'appliquer à d'autres réseaux de prairies dans d'autres conditions pédoclimatiques, mais aussi de s'intéresser à d'autres panels de propriétés disponibles comme la valeur alimentaire du fourrage.

Actuellement, la typologie phytosociologique est utilisée à l'échelle européenne pour définir les prairies à protéger pour des raisons écologiques. La capacité de cette approche typologique à prédire une valeur agronomique ne s'est pas avérée optimale. L'utilisation d'une association de typologies pourrait affiner la prédiction de la valeur agronomique et écologique des prairies, permettant de mieux gérer les compromis entre conservation écologique et valeur agronomique des prairies pour les éleveurs.

Accepté pour publication,
le 15 janvier 2019

Remerciements : Nous souhaitons remercier les contributeurs au programme d'étude des prairies permanentes du massif vosgien : Julien Bourbier (PNR Ballons des Vosges), Rémi Collaud (Conservatoire Botanique National de Franche-Comté), Thierry Froelicher (Communauté de Communes de la Vallée de Villé) et Jean-Sébastien Laumond (Communauté de Communes de la Vallée de la Bruche), ainsi que Mélissa Berthet (Institut Jean Nicod, ENS Paris) pour ses conseils statistiques. Ce programme est financé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, le Fonds Européen de Développement Régional, le Commissariat au Massif des Vosges et la Région Grand-Est.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGRESTE (2017) : *Cultures Fourragères*, www.agreste.agriculture.gouv.fr
- BAYEUR C., KLEIBER F., L'HOSPITALIER M., LORIDAT F., PLANTUREUX S. (2013) : *Typologie des prairies permanentes Vosges du Nord et Vosges Mosellanes? : guide technique 2013*, PNR Vosges du Nord, 68 p.
- BECU D., LECONTE R., MESTELAN P., SAINT-VAL M. (2017) : *Les prairies «naturelles» de Champagne-Ardenne – Guide technique*, édité par CENCA, CBNBP et SCOPELA, 182 p.
- BELLO F. DE, LAVERGNE S., MEYNARD C.N., LEPS J., THUILLER W. (2010) : «The partitioning of diversity : showing Theseus a way out of the labyrinth», *J. Vegetation Sci.*, 21, 992-1000.
- BONARI G., FAJMON K., MALENOVSKÝ I., ZELENÝ D., HOLUŠA J., JONGEPIEROVÁ I., KOČÁREK P., KONVIČKA O., UŘIČÁŘ J., CHYTRÝ M. (2017) : «Management of semi-natural grasslands benefiting both plant and insect diversity: The importance of heterogeneity and tradition», *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 246, 243-252.

- BURNHAM K.P., ANDERSON D.R. (2002) : *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*, 2nd ed., ed. Springer, New York, 488 p.
- CARRÈRE P., SEYTRÉ L., PIQUET M., LANDRIEUX J., RIVIÈRE J., CHABALIER 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.
- CASSMAN K.G., MUNNS D.N. (1980) : «Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature, and depth», *Soil Science Society of America J.*, 44, 1233-1237.
- CHENG Y., KAMIJO T., TSUBO M., NAKAMURA T. (2013) : «Phytosociology of Hulunbeier grassland vegetation in Inner Mongolia, China», *Phytocoenologia*, 43, 41-51.
- COLLECTIF (2006) : *Le Massif Vosgien?: Typologie des Prairies Naturelles*, Chambre d'Agriculture des Vosges.
- CRUZ P., THEAU J.P., LECLoux E., JOUANY C., DURU M. (2010) : «Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes: une classification multitraits», *Fourrages*, 201, 11-17.
- DENGLER J., CHYTRÝ M., EWALD J. (2008) : «Phytosociology», *Encyclopedia of Ecology*, Elsevier, 2767-2779.
- D'OTTAVIO P., FRANCONI M., TROZZO L., SEDIĆ E., BUDIMIR K., AVANZOLINI P., TROMBETTA M.F., PORQUEDDU C., SANTILOCCHI R., TODERI M. (2017) : «Trends and approaches in the analysis of ecosystem services provided by grazing systems: A review», *Grass and Forage Sci.*, 73 (1), 15-25.
- DURANTE M., LEZANA L., MASSA E., FIGARI M., LEZAMA F., JAURENA M., CRUZ P. (2012) : «A first attempt to classify in functional groups grasses of Entre Rios (Argentina) and Uruguay», *Int. Symp. on Integrated Crop-Livestock Systems*, Porto Alegre, Brasil, p 4.
- ELLENBERG H., WEBER H.E., DÜLL R., WIRTH V., WERNER W., PAULISSEN D. (1992) : «Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa», *Scripta Geobotanica*, vol. 18, 258 p.
- EUROSTAT (2017) : *Permanent grassland: number of farms and areas by agricultural size of farm (UAA) and size of permanent grassland area*.
- FERREZ Y., CHOLET J., DOR J.C., DUPONT F., FROELICHER T., GIOVANNACCI L., HENNEQUIN C., LAUMOND J.S., L'HOSPITALIER M., NGUEFACK J., SIMLER N., VOIRIN M. (2017) : *Guide phytosociologique des prairies du massif des Vosges et du Jura alsacien*, CBNFC, CBNNE et CBA éd., 368 p.
- HARRIS P., BOL R., EVANS J., HAWKINS J.M.B., DIXON E.R., WOLF K., DUNGAIT J.A.J., GRIFFITH B., HERBST M., DHANOA M.S., BEAUMONT D.A., DUNN R.M., WIESENBERG G.L.B. (2017) : «Effect of long-term drainage on plant community, soil carbon and nitrogen contents and stable isotopic ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$) composition of a permanent grassland: Drainage effect on plant soil carbon nitrogen», *Europ. J. Soil Sci.*, 69 (1), 28-68.
- HEGLAND S.J., TOTLAND Ø. (2005) : «Relationships between species' floral traits and pollinator visitation in a temperate grassland», *Oecologia*, 145, 586-594.
- HOETKER G. (2007) : «The use of logit and probit models in strategic management research: Critical issues», *Strategic Management J.*, 28, 331-343.
- JEANNIN B., FLEURY P., DORIOZ J.M. (1991) : «Typologie des prairies d'altitude des Alpes du Nord: méthode et réalisation», *Fourrages*, 128, 379-396.
- KIDD J., MANNING P., SIMKIN J., PEACOCK S., STOCKDALE E. (2017) : «Impacts of 120 years of fertilizer addition on a temperate grassland ecosystem», *PLOS ONE*, 12, e0174632.
- KOPEĆ M., ZARZYCKI J., GONDEK K. (2010) : «Species diversity of submontane grasslands: effects of topographic and soil factors», *Polish J. of Ecology*, 28 (2), 285-295.
- LAUNAY F., BAUMONT R., PLANTUREUX S., FARRIÉ J.P., MICHAUD A., POTTIER E. (2011) : *Prairies permanentes : Des références pour valoriser leur diversité*, Institut de l'Elevage, Paris, 128 p.
- LAVOREL S., GARNIER É. (2002) : «Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail», *Functional ecology*, 16, 545-556.
- LECONTE D., SIMON J.C., DIQUÉLOU S. (2008) : «Diversité floristique et typologie des prairies permanentes bas-normandes», *Les Cahiers d'Orphée*, 1, 35-49.
- LE ROUX X., BARBAULT J., BAUDRY J., BUREL F., DOUSSAN I., GARNIER E., HERZOG F., LAVOREL S., LIFRAN R., ROGER-ESTRADE J., SARTHOU J.P. (2008) : *Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies, expertise scientifique*, INRA, 738 p.
- MAUCHAMP L., MOULY A., BADOT P.M., GILLET F. (2014) : «Impact of management type and intensity on multiple facets of grassland biodiversity in the French Jura Mountains», *Applied Vegetation Sci.*, 17, 645-657.
- MICHAUD A., CARRÈRE P., FARRUGGIA A., JEANGROS B., ORTH D., PAUTHENET Y., PLANTUREUX S. (2013) : «Construire des typologies de prairies pour évaluer leur potentiel à rendre des services agro-environnementaux», *Fourrages*, 213, 35-44.
- ORAM N.J., RAVENEK J.M., BARRY K.E., WEIGELT A., CHEN H., GESSLER A., GOCKELE A., DE KROON H., VAN DER PAAUW J.W., SCHERER-LORENZEN M., SMIT-TIEKSTRA A., VAN RUIJVEN J., MOMMER L. (2018) : «Below-ground complementarity effects in a grassland biodiversity experiment are related to deep-rooting species», *J. Ecology*, 106, 265-277.
- PLANTUREUX S., AMIAUD B. (2009) : *E-flora-sys*, en ligne : <http://eflorasys.univ-lorraine.fr/>
- PLANTUREUX S., BONISCHOT R., GUCKERT A. (1993) : «Classification, vegetation dynamics and forage production of permanent pastures in Lorraine», *Europ. J. of Agronomy*, 2, 11-17.
- RICOU C., SCHNELLER C., AMIAUD B., PLANTUREUX S., BOCKSTALLER C. (2014) : «A vegetation-based indicator to assess the pollination value of field margin flora», *Ecological Indicators*, 45, 320-331.
- RODRÍGUEZ-ROJO M.P., JIMÉNEZ-ALFARO B., JANDT U., BRUELHEIDE H., RODWELL J.S., SCHAMINÉE J.H.J., PERRIN P.M., KAČKI Z., WILLNER W., FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ F., CHYTRÝ M. (2017) : «Diversity of lowland hay meadows and pastures in Western and Central Europe», *Applied Vegetation Sci.*, 20, 702-719.
- SCHELLBERG J. (1999) : «Long-term effects of fertilizer on soil nutrient concentration, yield, forage quality and floristic composition of a hay meadow in the Eifel mountains, Germany», *Grass and Forage Sci.*, 54, 195-207.
- SETUBAL R.B., BOLDRINI I.I. (2012) : «Phytosociology and natural subtropical grassland communities on a granitic hill in southern Brazil», *Rodriguésia*, 63, 513-524.
- SULLIVAN C.A., SKEFFINGTON M.S., GORMALLY M.J., FINN J.A. (2010) : «The ecological status of grasslands on lowland farmlands in western Ireland and implications for grassland classification and nature value assessment», *Biological Conservation*, 143, 1529-1539.
- SULLIVAN C.A., FINN J.A., Ó HÚALLACHÁIN D., GREEN S., MATIN S., MEREDITH D., CLIFFORD B., MORAN J. (2017) : «The development of a national typology for High Nature Value farmland in Ireland based on farm-scale characteristics», *Land Use Policy*, 67, 401-414.
- THEAU J.P., PAUTHENET Y., CRUZ P. (2017) : «Une typologie des espèces non graminéennes pour mieux caractériser la diversité et la valeur d'usage des prairies permanentes», *Fourrages*, 232, 321-329.
- VIOLLE C., NAVAS M.L., VILE D., KAZAKOU E., FORTUNEL C., HUMMEL I., GARNIER E. (2007) : «Let the concept of trait be functional!», *Oikos*, 116, 882-892.
- WARZECHA D., DIEKÖTTER T., WOLTERS V., JAUKER F. (2017) : «Attractiveness of wildflower mixtures for wild bees and hoverflies depends on some key plant species», *Insect Conservation and Diversity*, 11 (1), 32-41.