



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)7.69.81.16.62 - Mail : contact@afpf-asso.fr

Association Francophone pour les Prairies et les Fourrages

Diagnostic et déterminants de la pérennité des prairies.

Sol et pérennité des prairies : un cercle vertueux

G. Pérès¹, K. Hoeffner², D. Cluzeau², M-L. Decau³, F. Gastal³, M. Legras⁴, F. Louault⁵, F. Vertès¹

RESUME

Les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols vont agir sur la croissance des plantes et conditionner la pérennité des prairies. Ainsi, la compaction d'un sol, sous l'action du pâturage ou du trafic d'engins, va aboutir à une perte de rendement, les effets étant variables selon la texture (plus marqués sur des sols plus argileux) et la saison. A contrario, la préservation des organismes des sols et des fonctions associées va contribuer à augmenter les rendements. En contrepartie, la gestion des prairies va aussi impacter les propriétés des sols. Ainsi, l'introduction de prairie dans la rotation culturale, va permettre rapidement dès la deuxième année de favoriser la biodiversité des sols (faune, microorganismes) et leurs activités. Plus largement, l'introduction de prairies dans une rotation de cultures annuelles influence positivement le maintien de la structure du sol et la conservation de la biodiversité, sans modifier la régulation hydrique. L'effet positif hérité de prairies dans la rotation est observable même trois années après la remise en culture. La pérennité des prairies va être conditionnée par plusieurs facteurs : la durée de prairie dans la rotation, la gestion du pâturage (chargement, période), la fertilisation et la diversité végétale. Des leviers existent pour assurer la durabilité de ces systèmes prairiaux temporaires ou permanents.

SUMMARY

Diagnosis and determinants of grassland sustainability. Soil and the sustainability of grasslands: a virtuous circle

The physical, chemical and biological properties of the soil will affect plant growth and condition the sustainability of the grasslands. Thus, soil compaction due to grazing or machine traffic will result in a loss of yield, the effects being variable according to texture (more pronounced on more clayey soils) and season. On the other hand, the preservation of soil organisms and associated functions will contribute to increasing yields. On the other hand, grassland management will also impact soil properties. Thus, the introduction of grassland in the crop rotation will quickly allow, from the second year, to favor soil biodiversity (fauna, microorganisms) and their activities. More broadly, the introduction of grassland into an annual crop rotation positively influences the maintenance of soil structure and the conservation of biodiversity, without modifying water regulation. The positive effect inherited from grasslands in the rotation can be observed even three years after recultivation. The sustainability of the grasslands will be conditioned by several factors: the duration of the grassland in the rotation, grazing management (load, period), fertilization and plant diversity. Levers exist to ensure the sustainability of these temporary or permanent grassland systems.

La pérennité d'une prairie peut être définie par sa capacité à maintenir sur du long terme des fonctions et des services écosystémiques notamment des services d'approvisionnement (quantité, qualité des fourrages) ainsi que des services de régulation (régulation hydrique, régulation climatique, maintien de la structure du sol, régulation des pathogènes, conservation de la biodiversité). Par le prisme du sol, des boucles de rétroaction s'opèrent en

permanence. Aborder le lien entre sol et pérennité des prairies peut être vu sous deux angles : i) comment le sol et ses propriétés, impactent-ils les prairies et leur pérennité ? ii) comment les prairies et leurs modes de gestion, agissent-ils sur le sol et peuvent-ils contribuer ou non à maintenir sa qualité vue à travers sa multifonctionnalité.

Les sols, systèmes dynamiques résultant d'interactions entre une composante chimique,

AUTEURS

1 : Institut Agro, INRAE, SAS, 35000 Rennes, France

2 : Université Rennes 1, CNRS, ECOBIO (Ecosystèmes, biodiversité, évolution), 35000 Rennes France

3 : INRAE, UE FERLUS, F-86600, Lusignan

4 : Institut Polytechnique UniLaSalle, Unité AGHYLE, SFR 4277 Normandie Végétal, 76134 Mont-Saint-Aignan

5 : INRAE, Université Clermont Auvergne, VetAgro Sup, UMR Ecosystème Prairial, 63000, Clermont-Ferrand, France

MOTS-CLES : Pérennité des prairies, sol, fertilisation, rotation, structure du sol

KEY-WORDS: Grassland sustainability, soil, fertilization, rotation, soil structure

REFERENCE DE L'ARTICLE : Pérès G., Hoeffner K., Cluzeau D., Decau M.-L., Gastal F., Legras M., Louault F., Vertès F., (2022). « Diagnostic et déterminants de la pérennité des prairies. Sol et pérennité des prairies : un cercle vertueux ». Fourrages 250, 39-47

physique et biologique, abritent une biodiversité très importante, tant en termes d'abondance ou biomasse des organismes qu'en termes de nombre d'espèces et de fonctions associées. Il est maintenant reconnu que ces organismes du sol et leurs interactions jouent un rôle fondamental dans un grand nombre de processus et fonctions du sol, tels que la dégradation de la matière organique, le cycle des nutriments, la structuration des sols, la régulation des pathogènes et la biorémédiation des contaminants, aboutissant in fine à différents services écosystémiques de régulation et d'approvisionnement (Lavelle *et al.*, 2006 ; Kibbelwhite *et al.*, 2008 ; Pulleman *et al.*, 2012). La conservation de

la biodiversité des sols, des fonctions et des services associés est donc un enjeu clé dans le maintien des agrosystèmes et notamment la pérennité des prairies (figure 1). Dans le cadre de cette étude, l'effet du sol sur la pérennité des prairies sera abordé à travers l'effet des propriétés physiques du sol et l'effet des organismes du sol sur les fonctions et services écosystémiques des prairies. Dans un second temps, les effets de différents modes de gestion des prairies sur les propriétés des sols et sur différents services écosystémiques seront présentés, avec un focus sur la composante biologique, afin de mettre en exergue les modes de gestion permettant de favoriser la pérennité des prairies.

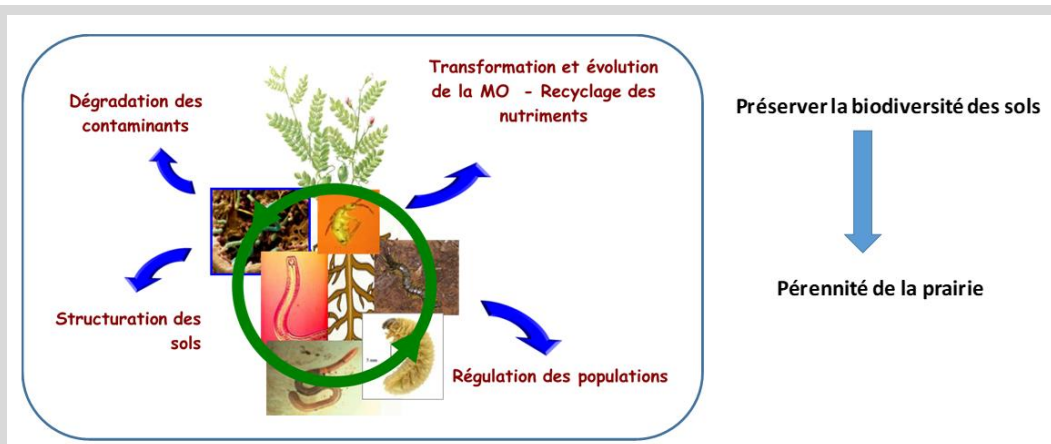


FIGURE 1 : Les 4 grandes fonctions associées aux organismes des sols (d'après Blanchart, 2012)
 Figure 1 : The 4 major functions associated with soil organisms (from Blanchart, 2012)

1. Effet du sol sur les prairies

1.1. Effet des propriétés physiques des sols sur les prairies

La structure des sols est reconnue comme étant une des propriétés majeures influençant le développement des plantes (figure 2), notamment à travers l'intensité de compaction (Stirzaker *et al.*, 1996).

La compaction des sols, qui correspond à une diminution de la porosité, réduit la diffusion du dioxygène (Batey, 2009) et les transferts hydriques, que ce soit la conductivité hydraulique dans les sols (Lamandé *et al.*, 2003) ou la capacité de rétention en eau. Les habitats étant altérées pour les organismes du sol, cette compaction va aboutir à une réduction des activités biologiques, notamment en termes de minéralisation, ralentissant ainsi la dynamique d'évolution des matières

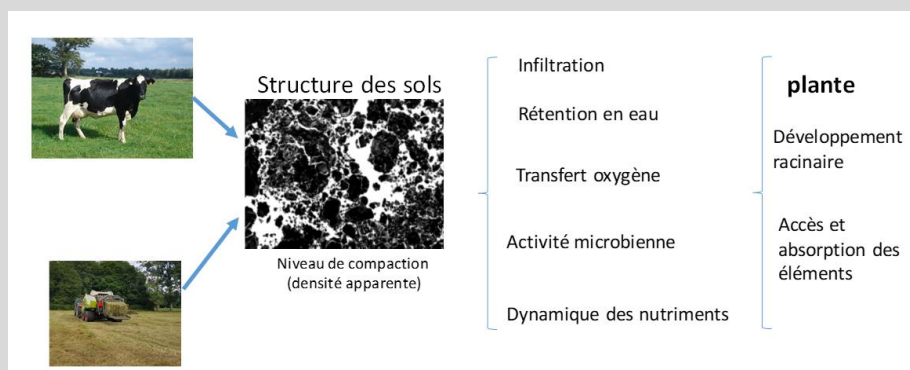


FIGURE 2 : Exemple d'effets de la structure sur différentes propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, et conséquences sur les plantes.
 Figure 2 : Example of effects of structure on different physical, chemical and biological properties of soils, and consequences on plants.

organiques et le cycle des éléments nutritifs (Cui and Holden, 2015). Ces modifications tant structurales que biochimiques vont *in fine* altérer le développement des plantes que ce soit *via* l'altération du développement racinaire (Taylor et Brar, 1991 ; Głaḇ, 2013) ou encore la capacité d'absorption des éléments nutritifs par les plantes (Arvidsson, 1999 ; Hargreaves *et al.*, 2019), conduisant ainsi à des diminutions de biomasse produite.

En milieu prairial, la compaction des sols est essentiellement conditionnée par deux facteurs, à savoir le piétinement par les animaux au pâturage (chargement, fréquence, période) (Lamandé *et al.*, 2003) et le trafic d'engins, impactant tous deux la pérennité des prairies (Cluzeau *et al.*, 1992). Les travaux menés au Royaume Uni (Hargreaves *et al.*, 2019) ont mis en évidence que sur trois années, les dommages de compaction liés au pâturage et au trafic d'engins aboutissaient à des pertes moyennes de rendements de 7.8 % et 7.4 % respectivement, par rapport à des prairies non compactées (densité apparente = 1.2) (figure 3).

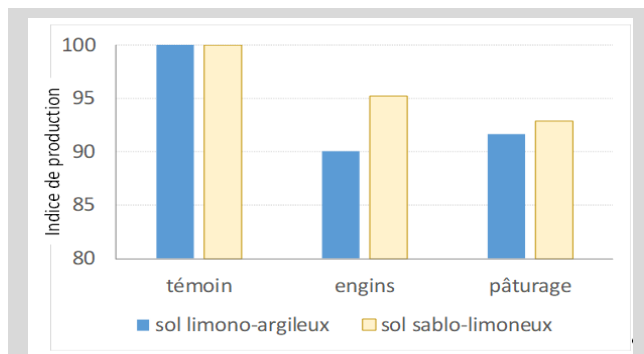


FIGURE 3 : Effets du passage d'engins de récolte ou d'animaux au pâturage sur l'indice de production de biomasse (moyenne de 3 ans, témoin ramené à 100), sur 2 types de sol (d'après Hargreaves *et al.*, 2019).

*Figure 3 : Effects of passing harvesting equipment or grazing animals on biomass production index (3-year average, control set to 100), on 2 soil types (from Hargreaves *et al.*, 2019).*

Ces impacts varient en fonction du type de sol : les pertes moyennes de production liées au pâturage étaient de 8.4 % sur un sol limono-argileux *vs* 7.2 % sur un sol sablo-limoneux ; l'effet « texture » était encore plus notable lorsqu'il s'agit de l'impact du trafic d'engins : la perte de rendement était en moyenne de 10 % sur une texture plus argileuse *vs* 4.8 % sur une texture plus sableuse.

L'effet cumulatif de ces impacts est aussi à prendre en considération : ainsi après trois années d'étude, le pâturage conduisait à une perte annuelle de 11,4 – 12 % de rendement sur un sol plutôt argileux et plus sableux, respectivement ; les impacts liés au trafic d'engins étaient plus délétères, conduisant à une perte moyenne de 14.5 % sur les deux types de sols. A un grain temporel plus fin, intra-annuel, l'intensité des

impacts varie en fonction des saisons, la période printanière (mai) correspondant à la saison où les impacts sont les plus importants, pouvant conduire jusqu'à une perte de 19 % des rendements en lien avec le pâturage et jusque 37.7 % en lien avec le trafic. Les modes de gestion des prairies comme l'intensité du pâturage (chargement, fréquence, période) et l'intensité du trafic, conduisant à des intensités de compaction différenciées, sont donc de vrais leviers pour assurer la pérennité des prairies en lien avec la portance et la plus ou moins grande fragilité de structure des sols.

1.2. Effet des propriétés biologiques des sols sur les prairies

Les organismes du sol (édaphon) jouent un rôle majeur sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Parmi ces organismes, les microorganismes (bactéries, champignons, archa, algues) et les lombriciens constituent la plus forte biomasse vivante avec respectivement 3 T/ha et 1.5 T/ha en moyenne, en milieu tempéré. Au sein de l'édaphon, les lombriciens, qui appartiennent à la macrofaune (>2 mm de diamètre) sont identifiés comme étant les principaux ingénieurs physiques du sol (Pulleman *et al.*, 2012 ; Blouin *et al.*, 2013) par leur capacité à modifier la structure lors i) de leurs activités de forage des galeries et chambres d'estivation (en moyenne 10 % du volume poral du sol) aboutissant à une macro-porosité tubulaire, ii) de l'ingestion du sol (les lombriciens ingèrent quotidiennement 30 fois leur poids (Pères, 2016), iii) de leur production de déjections (en milieu tempéré 1 tonne de vers de terre produit annuellement 240 T de déjections par hectare en moyenne, Bouché et Al-Addan, 1997). Ces déjections correspondent à un mélange entre matières organiques et matières minérales, et sont déposées dans le sol (définissant une structure grumeleuse) ou à la surface (turricules). Cet effet sur la structure des sols va cependant dépendre de la catégorie écologique de lombriciens (Bouché, 1972) :

- les épigés, individus de petite taille (<5 cm), vivant à la surface du sol, ingèrent peu de matière minérale et créent peu, voire pas de galerie,
- les endogés, individus de petite à moyenne taille (1-20 cm), vivent principalement dans les 30-40 premiers centimètres du sol et créent des galeries horizontales à sub-horizontales temporaires, car rebouchées partiellement par leur déjection,
- les anéciques (épi-anéciques et anéciques-stricts), individus de taille moyenne à grande (5-100 cm), évoluent sur l'ensemble du profil, créant des galeries verticales à sub-verticales permanentes.

Ces bio-structures (galeries, déjections) vont agir directement sur la régulation hydrique du sol, pouvant ainsi améliorer l'infiltration de plus de 50 % et la capacité de rétention en eau, conditionnant la réserve en eau utile pour les plantes, de 25 % (Pères, 2016). Par ailleurs, les porosités tubulaire et agrégative liées à ces

bio-structures vont physiquement permettre le développement racinaire ; leur importance et leur distribution dans le sol peuvent être cartographiées sur l'ensemble du profil (Piron *et al.*, 2017) et rendent compte du potentiel d'exploration racinaire. En parallèle de l'effet de ces bio-structures sur la régulation hydrique, les lombriciens agissent sur d'autres processus, notamment l'évolution de la matière organique et la stimulation des microorganismes qui favorisent la dynamique des éléments nutritifs (Blouin *et al.*, 2013 ; Pères, 2016).

C'est *via* l'ensemble de ces fonctions et de leurs interactions que les lombriciens vont contribuer au développement des plantes et à la production de biomasse. Ainsi, une méta-analyse (462 données, 58 études menées au laboratoire ou au terrain ; van Groenigen *et al.*, 2014 ; figure 4) mettent en avant que la présence de lombriciens est associée à une augmentation moyenne de 25 % des rendements, toutes productions confondues, et de 23 % lorsque seule la biomasse aérienne est prise en compte. Concernant les prairies, les lombriciens sont associés en moyenne à une augmentation de 24 % des rendements (*vs* 31 % pour les productions céréalières) ; cet effet positif est conditionné par la présence ou non de légumineuses : en absence de légumineuses l'effet positif est en moyenne de 30 %, alors qu'il n'est que de 10 % en présence de légumineuses.

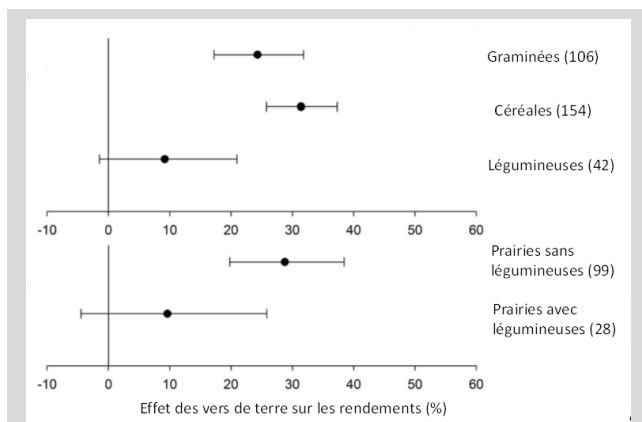


FIGURE 4 : Effet de la présence de lombriciens sur les rendements (en % par rapport à des témoins : en études menées au laboratoire, le témoin correspond à un traitement sans vers de terre, en étude au terrain, « zéro » vers de terre n'existant pas, le témoin correspond à un traitement hébergeant un nombre de vers de terre égal ou inférieur aux 10 % du nombre total de vers de terre du traitement testé) d'après la méta-analyse de Van Groenigen *et al.*, (2014).

Figure 4 : Effect of earthworm presence on yields (in % relative to controls: in laboratory studies, the control corresponds to a treatment with no earthworms, in field studies, since "zero" earthworms do not exist, the control corresponds to a treatment hosting a number of earthworms equal to or less than 10 % of the total number of earthworms in the treatment tested) from the meta-analysis of Van Groenigen *et al.*, (2014)

Cependant, ces effets positifs des lombriciens sur les rendements sont fonction de plusieurs paramètres. Ainsi, toutes formes de productions confondues, l'effet va varier selon : i) la densité lombricienne : l'intensité de l'effet positif est corrélée à la densité, ii) la structure écologique : les anéciques ont un effet positif supérieur à celui des endogés et des épigés (respectivement >30 %, 25 %, <20 %), iii) la fertilisation azotée : l'effet positif de la présence des lombriciens est plus important sous une faible fertilisation (< 30 kg N/ha/an) que sous une fertilisation plus importante (respectivement : 20 % *vs* <10 %), iv) la texture : l'effet positif est d'autant plus important que le sol présente une texture riche en éléments fins (argileuse > limoneuse > sableuse).

L'évaluation de l'effet des lombriciens sur la pérennité des prairies doit donc prendre en compte l'ensemble de ces facteurs abiotiques et biotiques ; la préservation des communautés lombriciennes et plus largement des organismes des sols et des fonctions associées, semble aussi définir un des leviers de la pérennité des prairies.

2. Effet des prairies et modes de gestion des prairies sur les sols

Les prairies abritent une biodiversité importante que ce soit en termes de diversité des espèces qu'en termes d'abondance ou de biomasse des organismes (Cluzeau *et al.*, 2012). A l'échelle du bassin versant de Naizin de l'ORE AgrHys, le projet ANR-SoilServ (<https://www.inrae.fr/soilserv/>), a mis en avant qu'au-delà des propriétés du sol (pH, hydromorphie, texture, densité apparente), les organismes du sol, notamment les lombriciens et les carabes, sont positivement influencés par les phases prairiales et par une réduction du nombre de travaux profonds du sol dans la rotation. Par ailleurs, en sus de l'occupation du sol, l'antériorité du nombre d'années continues de prairie dans la rotation influence de façon prépondérante les réponses biologiques (Pères *et al.*, 2021).

Si les prairies abritent une biodiversité importante, il existe cependant une très grande variabilité de réponses biologiques en termes de densité et biodiversité d'organismes des sols entre systèmes prairiaux. Ainsi à l'échelle régionale bretonne, les valeurs d'abondance lombricienne dans les prairies varient entre 32 et 1332 individus par m² (valeur moyenne 350 individus/m²), de même les abondances de nématodes varient entre 3.7 et 52.7 individus/g sol sec (moyenne 20.6 i/g), et les biomasses microbiennes présentent des valeurs de 1^{ers} et 3^{emes} quartiles respectivement de 326.5 et 446.0 mg C/kg de sol (Cluzeau *et al.*, 2012). Ces fortes variabilités sont liées à la place des prairies dans les rotations et aux différents usages et modes de gestion des prairies. A l'échelle d'une exploitation (Site atelier Yvetot – Programme Bioindicateur ADEME ; <https://ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME->

Bioindicateur) ces mêmes abondances de vers de terre varient entre 57 à 337 individus par m², les abondances de nématodes varient entre 0.7 et 3.7 individus/g sol sec et les biomasses microbiennes entre 250 et 988 mg C/kg de sol en fonction du mode gestion des prairies (prairies permanentes, prairies de restauration ou prairies temporaires) (Legras *et al.* 2011).

2.1. Effet de l'introduction de prairie dans une rotation culturale

Les travaux menés sur le dispositif du SOERE-ACBB Lusignan (INRAe, AllEnvi) ont permis d'évaluer les effets sur les communautés lombriciennes et sur la production de fourrage i) de l'introduction de prairie non pâturée dans une rotation Maïs grain-orge-blé, ii) de la durée des prairies (3 ans *vs* 6 ans) et iii) du niveau de fertilisation azotée (230 kg/ha/an *vs* 30 kg/ha/an) (Hoeffner *et al.*, 2021a). Ainsi, après 6 années d'expérimentation, il apparaît que l'introduction de 3 années de prairie faisant suite à 3 années de culture permet d'augmenter significativement l'abondance et la biomasse lombricienne (respectivement d'un facteur 4.8 et 8.3) comparé à la rotation sans prairie. Cela améliore la structure fonctionnelle de la communauté lombricienne en permettant le développement d'espèces épi-anéciques (facteur 150), anéciques strictes (facteur 15) et endogées (facteur 3). Enfin, cela améliore la richesse spécifique par le développement de cinq nouvelles espèces lombriciennes (figure 5).

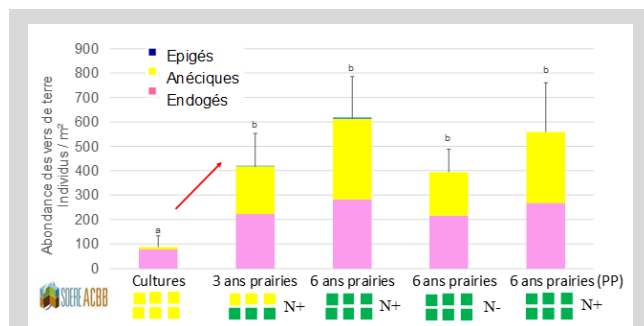


FIGURE 5 : Effet de l'introduction et de la durée de prairies fauchées dans une rotation culturale sur la densité lombricienne en fonction des différentes catégories écologiques (essai SOERE ACBB Lusignan, d'après Hoeffner *et al.*, 2021a).

Figure 5 : Effect of the introduction and duration of mowed grasslands in a crop rotation on earthworm density according to different ecological categories

La durée de la prairie est un point aussi très important : comparées à trois années de prairies, six années de prairies permettent d'augmenter significativement l'abondance et la biomasse lombricienne (facteur 1.5). Cela n'influence pas la richesse spécifique, mais cela améliore la structure fonctionnelle par le développement d'une espèce anécique stricte (*Aporrectodea l. longa*). En ce qui concerne la production fourragère, l'allongement de la durée de prairie n'influence pas de manière significative les rendements annuels (5.3 T/ha *vs* 5.5 T/ha), ni la

qualité des fourrages (respectivement 434 *vs* 432 mg C/g, 27 *vs* 25 mg N/g). La fertilisation azotée est, quant à elle, associée à une augmentation significative de l'abondance et de la biomasse lombricienne (facteur 1.6 et 1.4) en lien avec le développement d'une espèce anécique stricte, améliorant ainsi la structure fonctionnelle. Elle est aussi accompagnée d'une augmentation de la production fourragère (respectivement 1.7 t/ha pour une fertilisation azotée annuelle de 30 kg/ha *vs* 5.5 t/ha pour une fertilisation de 230 kg/ha/an) sans pour autant être associée à des modifications de la qualité des fourrages. Ces résultats soulignent par ailleurs la rapidité de la réponse biologique, puisque les différences sont mesurées dès la fin de la 1^{ère} rotation complète, à savoir lors de la troisième année de prairie faisant suite à trois années de cultures.

La rapidité de réponse des populations de lombriciens observée en prairie fauchée a aussi été observée en prairie pâturée. Ainsi, dans le cadre du projet ADEME Bioindicateur (Legras *et al.*, 2011), le site atelier Yvetot a permis de mettre en évidence que des prairies de restauration de 1 an ½ faisant suite à 4 ou 6 années de cultures, présentaient : i) des abondances et des biomasses lombriciennes significativement plus importantes que les parcelles en grandes cultures (respectivement 66 i/m² et 57 i/m² *vs* 25 i/m², 67 g/m² et 66 g/m² *vs* 20 g/m²), ii) une meilleure structure fonctionnelle liée au développement d'espèces anéciques, et une plus grande richesse spécifique (5 *vs* 3 espèces).

Plus globalement, en prenant en compte un ensemble plus large de bioindicateurs, ces prairies de restauration présentaient aussi des activités enzymatiques de type uréases et déshydrogénases de plus grande intensité que sous la grande culture. L'intérêt de 5 ans de prairie dans une rotation culturale a aussi été mis en évidence pour les lombriciens ainsi que pour la biomasse microbienne, l'abondance fongique et certaines activités enzymatiques (cellulase, phosphatase acide, beta-glucosidase, bêta-galactosidase, uréase, arylsulfatase), alors qu'aucun effet significatif n'a été mis en évidence concernant la biomasse ou densité bactérienne (Riah *et al.* 2021). Autre point intéressant, la mise en culture d'une prairie âgée de 5 ans, bien que conduisant à une diminution de la densité lombricienne (-17 %) et une altération de l'abondance des épigés, n'aboutit pas à une érosion totale de la densité ni de la biodiversité lombricienne (Figure 6). Enfin, il est important de noter que la prairie permanente (40 ans) s'est avérée offrir un habitat moins favorable que la prairie temporaire de 5 ans pour le développement de certains taxons : les abondances des communautés lombriciennes et des micro-arthropodes (collembolles et acariens) étaient significativement plus faibles dans la prairie permanente, et cela s'expliquait par une sur-exploitation de la prairie permanente car proche des bâtiments, conduisant à une compaction due au piétinement.

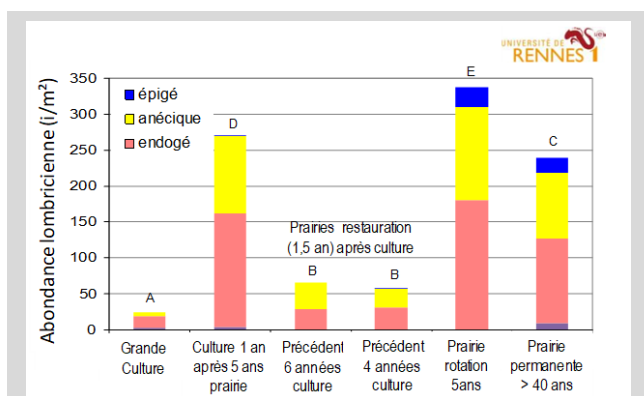


FIGURE 6 : Effet de l'introduction de prairies pâturées dans une rotation de grandes cultures sur la faune lombricienne du sol (dispositif Yvetot, d'après Pérès et al, 2010)

Figure 6 : Effect of the introduction of grazed grassland in a field crop rotation on the soil earthworm fauna

Plus largement, concernant un ensemble de paramètres du sol, le projet européen Biodiversa-Soilman (<https://soilman.eu>) a permis de renforcer ces résultats et de les traduire en services écosystémiques en mobilisant des indicateurs proxy de ces services : (i) maintien de la structure du sol (stabilité structurale), (ii) régulation hydrique (conductivité hydraulique), (iii) conservation de la biodiversité (biomasse et activité métabolique microbienne, champignons mycorrhiziens arbusculaires « AMF », communautés d'invertébrés : enchytréides, collemboles, lombriciens) (iv) régulation d'agents pathogènes (*Verticillium dahliae*) et (v) production fourragère. Ainsi, en s'appuyant sur le dispositif du SOERE ACBB Lusignan (INRAe, AllEnvi), le projet SoilMan met en évidence qu'après 12 années d'expérimentation, comparativement à une culture annuelle, l'intégration d'une prairie (3 ou 6 années de prairies continues, représentant respectivement 50 % ou 75 % de durée de prairie dans la rotation), permet (Hoeffner *et al.*, 2021b) :

- Une amélioration de la biomasse microbienne (de 29 %) dans l'horizon 10-20 cm,
- Une modification de la composition des communautés bactériennes, fongiques sans pour autant avoir un effet sur leur diversité
- Une augmentation de l'abondance des champignons mycorrhiziens arbusculaires « AMF » (+58 %)
- Le développement d'enchytréides de litière, tout en diminuant les enchytréides opportunistes (-91 %), modifiant ainsi la structure fonctionnelle, mais sans agir sur la richesse spécifique (nombre d'espèces)
- Le développement de collemboles eu-édaphiques (+79 %), sans pour autant agir sur l'abondance des collemboles

- L'augmentation de l'abondance lombricienne (+34 %) fortement liée au développement d'anéciques, et augmentation du nombre d'espèces.
- L'augmentation de la stabilité structurale dans les 10 premiers centimètres, de 38 % et 22 % respectivement sous humectation lente et humectation rapide,

A contrario, l'introduction d'une prairie n'influence pas l'activité métabolique microbienne, ni la capacité d'infiltration.

2.2. Effet hérité de l'introduction d'une prairie dans une rotation sur les propriétés du sol

Au-delà de l'effet positif de l'introduction d'une prairie dans le fonctionnement du sol, quelle est la pérennité de cet effet ? Autrement dit, peut-on observer un effet hérité de la prairie dans la rotation. Le projet SoilMan en s'appuyant sur le dispositif SOERE ACBB Lusignan (Hoeffner *et al.*, 2021b) a permis de mettre en évidence qu'après trois années de remise en culture d'une prairie, l'effet positif hérité de la prairie pouvait être observé sur certains paramètres et que cet effet variait selon l'historique prairial (figure 7). Ainsi, l'effet

Microorganismes	Effet prairie	Effet Héritage
Biomasse microbienne	✓ +29%	✓ +14-30%
Activité métabolique microbienne	✗	✓ ≈ -17%
Composition-diversité fongique	✓ - ✗	✗
Composition-diversité bactérienne	✓ - ✗	✗
Abundance ou richesse AMF	✓ +58%	✓ +29%
Mésafaune	Effet prairie	Effet Héritage
Abond. Enchytréides	✓ +/-	✓ +40%
Struc. fonctionnelle Ench.	✓ -91%	✓ +84%
Abond. Collemboles	✗	✗
Struc. fonctionnelle Collemboles	✓ +79%	✓ +71%
Macrofaune	Effet prairie	Effet Héritage
Abundance lombricienne	✓ +34%	✗
Richesse lombricienne	✓ +19%	✗
Maintien sol	Effet prairie	Effet Héritage
Stabilité structurale	✓ +30%	✓ +16%
Régulation hydrique	Effet prairie	Effet Héritage
Infiltration	✗	✗
Production	Effet prairie	Effet Héritage
Rendement		✗

FIGURE 7 : Effets directs ou hérités de la présence de prairies dans des rotations culturales sur divers paramètres et services écosystémiques liés au sol ; le signe vert renseigne d'un effet, le signe rouge renseigne d'une absence d'effet (d'après Pérès et al., Projet SoilMan et Hoeffner *et al.*, 2021b).

Figure 7 : Direct or inherited effects of the presence of grasslands in crop rotations on various soil-related parameters and ecosystem services; green sign indicates an effect, red sign indicates no effect (after Pérès et al., SoilMan Project and Hoeffner *et al.*, 2021b).

positif d'une durée de 75 % de prairie dans la rotation (6 années de prairies continues sur 9 ans) vs 50 % (3 années de prairies continues sur 6 ans) s'observe sur la stabilité structurale et sur des paramètres de certains taxons (biomasse microbienne, équitabilité et structure spécifique des champignons mycorrhiziens, abondance des collemboles épi-édaphiques, abondance des enchytréides particulièrement ceux de litière). *A contrario*, aucun héritage du passé prairial n'est observé sur les communautés lombriciennes, ni sur la régulation hydrique, la régulation du pathogène étudié ou la production fourragère de la prairie dans cet essai.

2.3. Effet du pâturage

La réponse des organismes du sol à la gestion du pâturage est toujours une balance entre les effets négatifs liés au matraquage du sol sous fort chargement ou conditions non portantes des sols, et les effets positifs des retours de matière organique par les déjections animales conduisant à améliorer la ressource trophique, ces effets positifs pouvant être directs, notamment via les déjections animales qui constituent une ressource pour les décomposeurs, ou indirecte car les déjections contribuent à la fertilité du sol. .

Effet du pâturage intensif : Il est toujours difficile de séparer les effets directs (mortalité des organismes du sol due au piétinement) des effets indirects (effets sub-létaux dus aux changements de qualité d'habitat des organismes du sol), mais un pâturage intensif peut être très délétère pour les organismes du sol, notamment les communautés lombriciennes, et cet effet varie selon le type de prairie. Ainsi, étudiant l'effet du pâturage intensif par des bovins d'une prairie mono-spécifique (ray-grass anglais) vs bi-spécifique (trèfle blanc + ray-grass anglais), Cluzeau *et al.* (1992) ont mis en évidence que le piétinement intensif induit une diminution significative de l'abondance et de la biomasse des lombriciens, cet effet étant d'autant plus important dans la prairie mixte (respectivement -70 % et 50 % sous graminée pure et -85 % et -77 % sous le mélange trèfle blanc-ray grass). L'effet est particulièrement observé sur les espèces épigées (*L. castaneus*) mais aussi, bien que dans une moindre mesure, sur les espèces anéciques et endogées. Par ailleurs, les juvéniles apparaissent plus sensibles.

Les travaux menés en Australie (King and Hutchinson, 1983) sur l'effet du pâturage par des ovins (10 moutons/ha vs 20 moutons/ha vs 30 moutons/ha) sur la biodiversité des sols, mettent en évidence que l'intensification du pâturage a des effets différents selon les organismes étudiés : l'intensification conduit à une diminution de l'abondance et de la biomasse des invertébrés totaux, spécifiquement des microarthropodes épi et héli-édaphiques, des nématodes et des enchytréides. Cela conduit aussi à la réduction de l'activité des petits décomposeurs (collemboles, acariens). *A contrario*, cette intensification favorise le développement des fourmis. Concernant les larves de scarabées et les lombriciens, leur densité est optimale

pour des chargements moyens. Le changement des communautés d'invertébrés est lié aux modifications de la qualité de leur habitat : espace de vie (gîte) et ressource trophique (couvert). Ces travaux mettent en exergue cet équilibre entre effets positif et négatif en fonction de la niche écologique des différents organismes.

Des leviers permettent-ils de limiter les impacts d'une fréquentation intensive ? Les travaux menés en Irlande (Curry *et al.*, 2008) démontrent qu'une fertilisation azotée élevée (390 kg N/ha) d'une prairie soumise à un pâturage intensif de bovins (1.75-2.5 bovin/ha), en favorisant le développement de la végétation, permet d'augmenter de manière significative l'abondance lombricienne (+50 %) et d'en doubler la biomasse. Cet effet est espèce dépendante, les espèces épigées et anéciques étant les plus favorisées. Les effets négatifs liés au piétinement sur les communautés lombriciennes semblent donc pouvoir être compensés par l'amélioration de la ressource trophique sous forme de restitution des déjections animales et de fertilisation conduisant au développement végétal.

2.4. Effet du type de gestion : pâturage, fauche, abandon

Dans un contexte de pâturage en moyenne montagne, les travaux menés sur le dispositif du SOERE- ACBB Theix (INRAe, AllEnvi) ont permis d'évaluer les effets sur le moyen terme de (i) l'utilisation de l'herbage, (ii) la présence d'animaux, (iii) l'intensité du pâturage des animaux et (iv) les types d'animaux

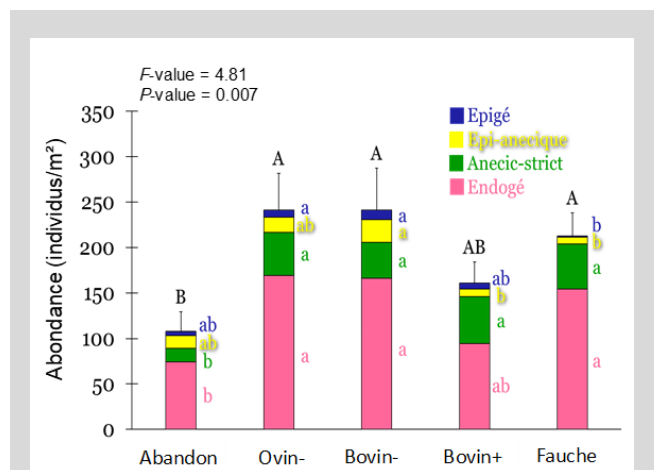


FIGURE 8 : Effets après 15 années d'expérimentation du mode de gestion des prairies (intensité du pâturage, type d'animaux, fauche ou abandon) sur les communautés de vers de terre – chargement : "Ovin-"= 0.73 UGB/ha, "Bovin-"= 0.73 UGB/ha, "Bovin+"= 1.46 UGB/ha (dispositif SOERE-ACBB Theix, d'après Hoeffner *et al.*, 2022).

*Figure 8 : Effects after 15 years of experimentation of grassland management (grazing intensity, type of animals, mowing or abandonment) on earthworm communities - loading: "Ovin-"= 0.73 LU/ha, "Bovin-"= 0.73 LU/ha, "Bovin+"= 1.46 LU/ha (SOERE-ACBB Theix device, according to Hoeffner *et al.*, 2022)*

(ovins ou bovins) sur les communautés de vers de terre dans les prairies permanentes mésophiles (figure 8). Des prairies abandonnées ou fauchées ont été comparées à des prairies pâturées (à intensités faibles ou plus élevées), pâturées par des bovins ou des ovins, et toutes conduites sans fertilisation minérale. Les résultats mettent en évidence qu'au bout de 15 années, comparativement à la prairie abandonnée, les prairies pâturées ou fauchées favorisent significativement la biomasse ainsi que la diversité lombricienne (richesse totale et indice de Shannon), et ce malgré une biomasse végétale au moins 1.7 fois moins importante. Par ailleurs, à l'exception des prairies pâturées par les bovins à intensité plus élevée, l'abondance lombricienne est *a minima* 2 fois plus élevée dans les prairies pâturées ou fauchées qu'abandonnées. Aucun effet de l'intensité du pâturage, ni du type d'animal n'est mis en évidence sur ce dispositif (Hoeffner *et al.*, 2022).

2.5. Effet de la diversité végétale

La diversité végétale va jouer un rôle sur les propriétés du sol. Au-delà de l'effet structurant des différents types de systèmes racinaires (pivotant, fasciculé, ramifié etc...) sur la macro et méso-porosité des sols, les plantes vont aussi agir de manière directe ou indirecte sur la stabilisation des agrégats. Ainsi les travaux menés en Allemagne sur le dispositif de Jena, permettent de comparer l'effet d'un gradient de diversité végétale (1, 4, 16 espèces) et de diversité fonctionnelle (1,2,3,4 groupes fonctionnels) sur la stabilité structurale et d'identifier les mécanismes contrôlant ce processus de stabilisation. Il apparaît que la diversité spécifique végétale (4 ou 16 espèces) favorise la stabilité structurale des agrégats, alors que la diversité fonctionnelle ne l'influence pas : la présence de graminées favorise la stabilité à l'inverse de la présence de légumineuses. Les mécanismes de structuration, liés à la diversité végétale, sont à relier avec les variations de biomasse racinaire, de biomasse microbienne et de concentrations en carbone organique des sols (Pérès *et al.*, 2013).

Conclusion

La pérennité des prairies ne peut être évaluée qu'en tenant compte d'une part i) des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols qui conditionnent le développement des plantes, ii) des variabilités spatiales et temporelles de ces propriétés et des fonctions associées, et d'autre part iii) des modes de gestions (prairies incluses dans des rotations culturales, pâturage, fertilisation, diversité végétale) qui vont impacter ces mêmes propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Le développement d'une vision holistique (multi compartiments, multi-fonctions, multi services écosystémique) et rétro-active du fonctionnement des prairies est nécessaire pour la conception d'agrosystèmes pérennes.

Remerciements

Les auteurs remercient les équipes techniques de l'UMR Ecobio (Université de Rennes 1) et de l'UMR SAS (Institut Agro Rennes-Angers, INRAe) pour leur implication dans les campagnes de terrain. Les auteurs remercient aussi les équipes techniques des dispositifs du SOERE ACBB de Lusignan et de Theix. Ces dispositifs sont insérés dans l'infrastructure AnaEE-F, bénéficiant d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-11-INBS-0001 AnaEE-Services. Ce travail a été soutenu financièrement par différents projets : le projet ADEME-Bioindicateur phase II (n°0875C0070), le projet Européen SoilMan (n° 01LC1620) de l'appel d'Offre BioDiversa 2015-2016 avec l'ANR comme financeur national, et le projet ANR-SoilServ (16-CE32-0005-01).

Article accepté pour publication le 18 juillet 2022

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arvidsson J., (1999). « Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction ». *Plant Soil* 208, 9–19.
- Batey T., (2009). « Soil compaction and soil management – a review ». *Soil Use Manage.* 25, 335–345.
- Blanchart E., (2012). « Quels bioindicateurs pour une gestion durable des sols ? ». *Journées techniques nationales de l'ADEME "Bioindicateurs et phytotechnologies"* 16-17 octobre 2012, Paris, France
- Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Dai J., Dendooven L., Peres G., Tondoh J.E., Cluzeau D., Brun J.-J., (2013). « A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services: earthworm impact on ecosystem services ». *Eur. J. Soil Sci.* 64, 161–182.
- Bouché M.B., (1972). « Lombriciens de France ». *Ecologie et systématique.* INRA Paris, 671 p
- Bouché M.B., Al-Addan F., (1997). « Earthworms, water infiltration and soil stability: some new assessments ». *Soil. Biol. Biochem.*, 29 (3/4):441-452
- Cluzeau D., Binet F., Vertès F., Simon J.C., Rivière J.M., Tréhen P., (1992). « Effects of intensive cattle trampling on soil-plant-earthworms system in two grassland types ». *Soil Biol. Biochem.* 24, 1661–1665
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Perrin C., Mateille T., Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G., (2012). « Integration of biodiversity in soil quality monitoring : baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types ». *Eur. J. Soil Biol.*, 49, 63–72
- Cui J., Holden N.M., (2015). « The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management ». *Soil Tillage Res.* 146, 32–38.
- Curry J.P., Doherty P., Purvis G., Schmidt O., (2008). « Relationships between earthworm populations and management intensity in cattle-grazed pastures in Ireland ». *Appl. Soil Ecol.* 39, 58–64.
- Głab T., (2013). « Effect of tractor traffic and N fertilization on the root morphology of grass/red clover mixture ». *Soil Tillage Res.* 134, 163–171.
- Hargreaves P.R., Baker K.L., Graceson A., Bonnett S., Ball B.C., Cloy J.M., (2019). « Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years ». *Eur. J. Agron.* <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125916>
- Hoeffner K., Hotte H., Cluzeau D., Charrier X., Gastal F., Pérès G., (2021a). « Effects of temporary grassland introduction into annual crop rotations and nitrogen fertilisation on earthworm communities and forage production ». *Appl. Soil Ecol.* 162, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103893>
- Hoeffner K., Beylich A., Chabbi A., Cluzeau D., Dascalu D., Graefe U., Guzmán G., Hallaire V., Hanisch J., Landa B.B., Linsler D., Menasseri S., Öpik M., Potthoff M., Sandor M., Scheu S., Schmelz R.M., Engell I., Schrader S., Vahter T., Banse M., Nicolai A., Plaas E., Runge T., Roslin T., Decau M.L., Sepp S.K., Arias-Giraldo L.F., Busnot S.,

- Roucaute M., Pérès G., (2021b). « Legacy effects of temporary grassland in annual crop rotation on soil ecosystem services ». STOTEN.- 780, 46140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146140>
- Hoeffner K., Louault F., Lerner L., Cluzeau D., Pérès G., (2022). « Utilisation of grassland vegetation is favourable to the development of earthworm communities ». ISEE12, 10-15 July 2022, Rennes, France
- Kibblewhite MG., Ritz K., Swift MJ.: « Soil health in agricultural systems ». *Philos Trans R Soc B* 2008, 363:685-701.
- King K.L., Hutchinson K.J., (1983). « The effect of sheep grazing on invertebrate numbers and biomass in unfertilized natural pasture of the New England Tablelands (NSX) ». *Austral Ecol.* 8 (3) 245-255.
- Lamandé M., Hallaire V., Curmi P., Pérès G., Cluzeau D., (2003). « Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements ». *CATENA, Achieve. Micromorphol.* 54, 637–649.
- Lavelle P., Decaens T., Aubert M., Barot S., Blouin M., Bureau F., et al . (2006). « Soil invertebrates and ecosystem services ». *Eur. J. Soil Biol.*, 42, 3–15.
- Legras M., Trap J., Guerout D., (2011). « Campagne 2010. Site expérimentation d'Yvetot. Programme Bioindicateur – Phase II ». ADEME. *Rapport d'activité.* 108 p
- Pérès G., Guernion M., Hotte H., Cluzeau D., (2010). « Indicateur lombricien. Résultats deuxième année. Programme Bioindicateur Phase II ». ADEME. *Rapport d'activité.* 36 p.
- Pérès G., Cluzeau D., Menasserri S., Soussana J.F., Bessler H., Engels C., Habekost M., Gleixner G., Weigelt A., Weisser W.W., Scheu S., Eisenhauer N., (2013). « Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient ». *Plant Soil* 373, 285–299.
- Pérès G., (2016). « Vingt mille yeux sous la terre ». In "Le sol, une merveille sous nos pieds" Feller C., de Marsily G., Mougin C., Pérès G., Poss R., Winiarski T (Eds), *Eds Belin Pour la science*, 256 pages, 110-147 p
- Pérès G., Benard Y., Fossey M., Plantegenest M., Walter C., (2021). « Key drivers of earthworm community distribution at landscape scale and ecosystem service associated ». *ICSZ conference*, 16-21 August, Italy. Poster presentation.
- Piron D., Boizard H., Heddadj D., Pérès G., Hallaire V., Cluzeau D., (2017). « Indicators of earthworm bioturbation to improve visual assessment of soil structure ». *Soil Tillage Res.*, 173, 53-63. doi : 10.1016/j.still.2016.10.013.
- Pulleman M., Creamer R., Hamer U., Helder J., Pelosi C., Pérès G., Rutgers M., (2012). « Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services-an overview of European approaches ». *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 4, 1-10.
- Riah-Anglet W., Cusset E., Chaussod R., Criquet S., Norini M.-P., Cheviron N., Mougin C., Laval K., Latour X., Legras M., Trinsoutrot-Gattin I., 2021. « Introducing Grasslands into Crop Rotations, a Way to Restore Microbiodiversity and Soil Functions ». *Agriculture*, 11, 909.
- Stirzaker R.J., Passioura J.B., Wilms Y., (1996). « Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores ». *Plant Soil* 185, 151-162.
- Taylor H.M., Brar G.S., (1991). « Effect of soil compaction on root development ». *Soil Tillage Res.* 19, 111-119.
- Van Groenigen J.W., Lubbers I.M., Vos H.M.J., Brown G.G., De Deyn G.B., van Groenigen K.J., (2014). « Earthworms increase plant production : a meta-analysis ». *Sci. Rep.* 4. Article number: 6365