

Revue scientifique sur la qualité biologique des sols de vignes et l'impact des pratiques viticoles

B. Karimi^(1,2), J.-Y. Cahurel⁽²⁾, L. Gontier⁽³⁾, L. Charlier⁽⁴⁾, M. Chovelon⁽⁵⁾, H. Mahé⁽⁶⁾ et L. Ranjard^(1*)

- 1) Agroécologie, AgroSup Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France
- 2) Institut Français de la Vigne et du Vin, BBS, 210 boulevard Vermorel, CS 60320, 69661 Villefranche-sur-Saône, Cedex, France
- 3) Institut Français de la Vigne et du Vin, pôle Sud-ouest, V'Innopôle, 1920 Route de Lisle sur Tarn, F-81310 Lisle sur Tarn, France
- 4) Conseil Interprofessionnel du Vin de Bordeaux, 1 cours du 30 juillet, 33075 Bordeaux Cedex, France
- 5) Groupe de Recherche en Agriculture Biologique, BP 11283 – 84911 Avignon, Cedex 9, France
- 6) Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne, 6 rue du 16^e Chasseur, 21200 Beaune, France

* : Auteur correspondant : lionel.ranjard@inrae.fr

RÉSUMÉ

La production viticole mondiale représente 7,5 millions d'ha pour un marché économique de 31 Mrd €. La viticulture constitue un secteur stratégique de l'économie agricole pour les principaux pays producteurs (Italie, France, Espagne, USA) mais également un des principaux consommateurs de produits phytosanitaires et de mécanisation. Ces pratiques ont des conséquences sur la qualité environnementale et plus particulièrement celle des sols. De plus en plus d'études tentent d'évaluer l'impact des pratiques viticoles sur la biodiversité du sol. Cependant, la diversité des pratiques et la diversité des organismes du sol rendent cette évaluation complexe. Dans ce contexte, nous proposons de faire une revue de la littérature internationale pour répondre à la question de la qualité biologique des sols viticoles et l'impact des pratiques viticoles. L'analyse de plus d'une centaine d'articles a permis de réunir des résultats sur plus de 50 modalités et 230 paramètres biologiques et d'en évaluer la généricité. Au-delà d'une synthèse des connaissances, les informations recueillies constituent une base robuste pour proposer un itinéraire technique viticole vertueux pour la qualité biologique des sols et pour les fonctions écologiques sur lesquelles repose la durabilité des productions viticoles. Ce travail débouche également sur l'identification des pistes de recherche concrètes à mener à court et moyen termes dans le domaine de la qualité des sols viticoles face aux enjeux de la viticulture.

Mots-clés

Biodiversité, sol, viticulture, mode de production, pratique viticole.

Comment citer cet article :

Karimi B., Cahurel J.-Y., Gontier L., Charlier L., Chovelon M., Mahé H. et Ranjard L. - 2020 - *Revue scientifique sur la qualité biologique des sols de vignes et l'impact des pratiques viticoles, Etude et Gestion des Sols*, 27, 221-239

Comment télécharger cet article :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-27/>

Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

SUMMARY**A REVIEW OF VITICULTURAL PRACTICE IMPACT ON SOIL BIOLOGICAL QUALITY AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY**

The World wine production represents 7.5 million ha for an economic market of €31 billion. Viticulture is a strategic sector of the agricultural economy for the main wine-producing countries (Italy, France, Spain, USA) but also one of the main consumers of phytosanitary and mechanical products. These practices have impacts on environmental quality and particularly soil. Increasing studies are attempting to assess the impact of viticultural practices on soil biodiversity. However, the diversity of practices and the diversity of soil organisms make this assessment complex. In this context, we propose a review of the international literature to answer the question of the biological quality of viticultural soils and the impact of viticultural practices. The analysis of more than a hundred articles provided results on more than 50 modalities and 230 biological parameters, allowing to evaluate the generality of trends. Beyond a knowledge synthesis, the information gathered provides a robust basis for proposing a virtuous technical viticultural itinerary for the biological quality of soils and for the ecological functions on which the sustainability of wine production is based. This work also leads to the identification of concrete perspectives of research to be carried out in the short and medium term in the field of viticultural soil quality facing to the challenges of viticulture.

Key-words

Biodiversity, soil, Vineyard, production system, viticultural practice.

RESUMEN**RESEÑA CIENTÍFICA SOBRE LA CALIDAD BIOLÓGICA DE LOS SUELOS DE VIÑAS Y EL IMPACTO DE LAS PRÁCTICAS VITÍCOLAS**

La producción vitícola mundial representa 7,5 millones de ha para un mercado económico de 31 Mrd €. La viticultura constituye un sector estratégico de la economía agrícola para los principales países productores (Italia, Francia, España, EEUU) pero igualmente uno de los principales consumidores de productos fitosanitarios y de mecanización. Estas prácticas tienen consecuencias sobre la calidad ambiental y más particularmente la de los suelos. Más y más estudios tienden a evaluar el impacto de las prácticas vitícolas sobre la biodiversidad del suelo. Sin embargo la diversidad de las prácticas y la diversidad de los organismos del suelo ponen esta evaluación compleja. En este contexto, proponemos hacer una reseña de la literatura internacional para responder al tema de la calidad biológica de los suelos vitícolas y del impacto de las prácticas vitícolas. El análisis de más de un centenar de artículos permitió recopilar resultados sobre más de 50 modalidades y 230 parámetros biológicos y evaluar la genericidad. Más allá de una síntesis de los conocimientos, las informaciones recogidas constituyen una base robusta para proponer un itinerario técnico virtuoso para la calidad biológica de los suelos y para las funciones ecológicas sobre las cuales se apoya la sostenibilidad de las producciones vitícolas. Este trabajo conduce igualmente a la identificación de las pistas de investigaciones concretas para llevar a corto y mediano términos en el ámbito de la calidad de los suelos vitícolas frente a los desafíos de la viticultura.

Palabras clave

Biodiversidad, suelo, viticulturas, modo de producción, practicas vitícolas

La viticulture représente un secteur d'activité agricole stratégique à l'échelle internationale qui représente environ 7,5 millions d'ha pour une production globale de vin de 293 millions d'hectolitres et un marché économique mondial qui représente 31 Mrd € (OIV, 2019). La France est le troisième pays au rang mondial en termes de surface viticole (800 000 ha), le deuxième en termes de production de vins (43,5 millions d'hl) et le premier exportateur de vins en valeurs avec un marché de 10 milliards d'€/an (OIV, 2019). Pour atteindre ces niveaux de production, la filière viticole est fortement consommatrice de produits phytosanitaires (20 % des pesticides sur 3 % des SAU en France) et de mécanisation pour l'entretien du sol (plus de 50 % des surfaces dans l'inter-rang et plus de 25 % des surfaces sous le rang en France, AGRESTE 2013). Ces pratiques ont des conséquences en termes de pollution de l'air, de l'eau et du sol, accélèrent l'érosion des sols, affectent le stockage du carbone et entraînent une érosion de la biodiversité. Ces dégradations de l'environnement se traduisent par une altération des fonctions écologiques et agronomiques des sols viticoles, remettant en cause la durabilité environnementale et économique de ces pratiques (Costantini *et al.*, 2018).

Face à ce constat, le monde viticole, au même titre que l'ensemble du monde agricole, doit faire face à une évolution majeure, la transition agro-écologique (Wezel *et al.*, 2009). Cette transition est un processus qui vise à rendre durable et pérenne une agriculture devenue intensive lors de l'après-guerre, en alliant des leviers issus de l'agronomie et de l'écologie. Dans cette transition, le sol représente un maillon fondamental puisqu'il est le support des productions, le moteur de la régulation de l'eau, de l'air et des ressources nutritives ainsi que le réservoir majeur de biodiversité de la planète (FAO, 2015). Ainsi, la qualité des sols et sa bonne gestion sont un bras de levier central pour tendre vers une viticulture écologiquement et économiquement durable.

La qualité d'un sol est déterminée par ses composantes chimique, physique, pédologique, agronomique et biologique. Dans le contexte de production viticole, les quatre premières composantes sont reconnues pour leur implication dans le développement de la vigne et la qualité du raisin (Van Leeuwen *et al.*, 2018). Elles sont donc historiquement mesurées, analysées et interprétées comme des effets « terroirs » ou de leviers agronomiques. Toutefois, la dégradation de la qualité physique des sols viticoles est observée de façon récurrente via soit des processus d'érosion et de tassement importants (Quiquerez *et al.*, 2008), soit par des processus de perte de matière organique (Belmonte *et al.*, 2018 ; Ruiz-Colmenero *et al.*, 2013), les deux processus étant reliés.

La qualité biologique des sols, définie comme l'aptitude d'un sol à héberger une grande quantité et diversité d'organismes vivants impliqués dans son fonctionnement et la fourniture de services écosystémiques, est actuellement mise en question pour les systèmes viticoles. Des travaux récents ont en effet

montré une baisse globale et systématique de l'abondance et de la diversité des organismes vivants dans les sols viticoles, en comparaison d'autres sols agricoles ou d'écosystèmes naturels (Coll *et al.*, 2011 ; Dequiedt *et al.*, 2011 ; Joimel *et al.*, 2017). Or, nombre d'expérimentations montrent qu'une perte trop importante de biodiversité dans un sol altère ses grandes fonctions d'intérêts pour les productions agricoles, telles que la dégradation de la matière organique (Baumann *et al.*, 2012), l'effet barrière aux populations de pathogènes (Vivant *et al.*, 2013), le maintien de la structure du sol (Le Guillou *et al.*, 2012) et plus globalement la stabilité du fonctionnement du sol (Tardy *et al.*, 2014).

Malgré ces constats, la qualité biologique des sols viticoles et l'impact des pratiques viticoles sont encore mal connus. Si le nombre d'études menées à l'échelle internationale sur ce sujet est en forte croissance, il manque à ce jour une synthèse de ces connaissances pour mieux évaluer l'impact des différentes pratiques viticoles sur les différents organismes du sol et, au-delà d'un aspect patrimonial, les répercussions sur les fonctions que les sols portent. C'est dans ce contexte que nous avons entrepris de faire la première synthèse bibliographique sur la qualité biologique des sols viticoles en répertoriant toute la littérature académique internationale de ces trente dernières années. Plus précisément, nous avons tout d'abord effectué une analyse bibliométrique qui nous a permis de suivre l'évolution du nombre de publications dans le temps et de situer l'origine géographique des études disponibles. Dans un deuxième temps, nous avons fait une synthèse scientifique de ces données en comparant tout d'abord l'impact des modes de production dits conventionnel, biologique et biodynamique, puis en considérant plus finement les différentes pratiques viticoles (travail du sol, enherbement, amendements organiques...) afin de rationaliser et de hiérarchiser leur impact quand cela était possible. Sur la base de cette analyse, nous avons proposé un itinéraire technique le plus vertueux possible basé sur les pratiques viticoles les plus à même de préserver la qualité biologique des sols. Enfin, cette synthèse nous a aussi permis d'identifier les pistes de recherche à développer à l'échelle internationale pour combler les manques de connaissances qui nous empêchent aujourd'hui d'intégrer pleinement la qualité biologique des sols comme levier d'action pour faire évoluer le modèle de production viticole vers une plus grande durabilité environnementale.

La version anglaise de cet article est publiée dans la revue *Environmental Chemistry Letters* (Karimi et al., 2020).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Mots-clés et recherche bibliographique

La combinaison de mots-clés utilisée pour la recherche est :

soil
ET *vineyards*
ET (**bio** OU **diversity**)
ET(*practice** OU *manage** OU *land use*)

où « ET » indique que les mots doivent apparaître simultanément dans les résultats de la recherche, « OU » indique que l'un des termes au moins doit apparaître dans les résultats, et * indique que la recherche concerne tous les mots contenant la suite de lettre donnée associée à un préfixe si * est situé avant et/ou associée à un suffixe si * est situé après (ex. : **bio** inclura *biodiversity*, *biology* et *microbiology*, mais également *antibiotic*; *manage** inclura *management*). La recherche a été effectuée dans la base de données Web Of Science. Le corpus d'articles a fait l'objet d'une analyse bibliométrique pour déterminer le cadre spatio-temporel de l'étude et avoir un aperçu de l'évolution de la problématique dans la recherche scientifique.

Terminologie de l'étude bibliographique

Les modalités renvoient aux mots-clés *practice**, *manage** et *land-use* de la recherche. Elles sont classées en 4 groupes : le mode d'usage, le mode de production, les pratiques (travail du sol, couverture du sol, fertilisation, traitements phytosanitaires, caractéristiques de la plante et irrigation), l'hétérogénéité temporelle et spatiale.

Les paramètres biologiques sont associés aux mots-clés *soil*, **bio** et *diversity*. Les groupes biologiques sont répartis entre la macrofaune, la mésofaune, la microfaune, et les microorganismes du sol (microbiote) (Maron et Ranjard, 2019; Terrat et Djemiel, 2019; Cortet et Hedde, 2020). Les paramètres mesurés touchent à 3 grandes propriétés de la qualité biologique d'un sol. Le patrimoine biologique est évalué par des mesures de biomasse, d'abondance ou d'alpha- ou beta-diversité (richesse, indice de Shannon, indice de Simpson, structure de communauté). L'état fonctionnel du sol se traduit par des mesures de respiration basale, quotient métabolique, activité enzymatique, colonisation mycorrhizienne, abondance de gènes fonctionnels, abondance de groupes fonctionnels ou trophiques. L'état sanitaire est renseigné par l'occurrence ou l'abondance de pathogènes ou ravageurs appartenant aux groupes des champignons, nématodes ou arthropodes. Des indices agrégés (indice écophysiolgique,

indices nématodes ou ratio de groupe taxonomique) sont également calculés pour rendre compte de la qualité biologique des sols. Afin de retranscrire le plus explicitement possible ces résultats, cette synthèse focalisera sur les paramètres biologiques suivant, déclinés pour chaque groupe biologique si disponibles : biomasse, abondance, richesse, activités (respiration basale et activités enzymatiques), gènes et groupes fonctionnels, occurrence de pathogènes ou ravageurs.

Évaluation de la généralité des résultats

Peu d'articles du corpus traitent les mêmes modalités et les mêmes paramètres biologiques. Les effets observés restent donc restreints aux conditions du dispositif expérimental testé. Néanmoins, selon le nombre de sites/vignobles investigués dans le dispositif et leur distribution, certains articles sont susceptibles de fournir des résultats généraux. Une règle de décision a été choisie afin d'évaluer la généralité des résultats pour chaque combinaison « modalité x paramètre biologique », en prenant en compte la diversité des stratégies expérimentales mises en œuvre pour étudier la qualité biologique des sols viticoles. Cette règle repose sur deux valeurs : le nombre d'articles traitant de la combinaison et le nombre total de parcelles comptabilisé dans ces mêmes articles. Leur multiplication est utilisée comme une notation de la généralité. Trois classes de note ont été fixées : une note inférieure ou égale à 10 indique des résultats non généraux (1 ou 2 articles avec peu de parcelles), une note comprise entre 11 et 50 indique une généralité faible à moyenne (un seul article avec un petit réseau de parcelles échantillonnées), une note supérieure à 50 correspond à une généralité forte (réseau de parcelles important et/ou plusieurs articles). Dans cette synthèse, une attention particulière sera portée aux résultats les mieux notés.

ANALYSE BIBLIOMÉTRIQUE

Une recherche globale avec les mots *soil* ET *vineyards* ET **bio** identifie 846 articles portant sur la biologie des sols viticoles. Parmi eux, 406 mentionnent l'effet des pratiques viticoles et seulement 126 apportent des informations sur la biologie du sol. Au final, les résultats de 104 articles pourront être exploités dans cette étude bibliographique, les 22 autres ne contenant pas de résultats exploitables (manque de contexte, article dans une langue étrangère autre que l'anglais, groupes biologiques endémiques, etc.).

Distribution spatiale et évolution temporelle des études

Les premières références sur la qualité biologique des sols viticoles ont été publiées dans les années 1980 et ont été très

sporadiques jusqu'en 2005, date à laquelle le sujet a gagné en intérêt de la part de la recherche scientifique (figure 1, courbe violette). Les premières études publiées sur l'effet des pratiques viticoles datent de 1995 mais c'est seulement depuis 2017 que le taux de publications devient significatif (figure 1, courbes rouge et jaune) et 40 % des articles parus depuis 25 ans datent des 3 dernières années.

La distribution géographique des sites viticoles étudiés dans les 104 publications analysées montre que la plupart des sites se concentrent en Europe et en Amérique du Nord, les vignobles d'Asie et d'Afrique n'étant quasiment pas représentés (figure 2). 50 % des publications concernent uniquement 3 pays européens : l'Italie (24 %), la France (13,5 %) et l'Espagne (12,5 %), les USA arrivant en 4^e position avec 9,6 % des

Figure 1 : Évolution du nombre de publication sur le sujet en 40 ans (source Web of Science).

Figure 1: Evolution of publication number on the subject for the last 40 years (source Web of Science).

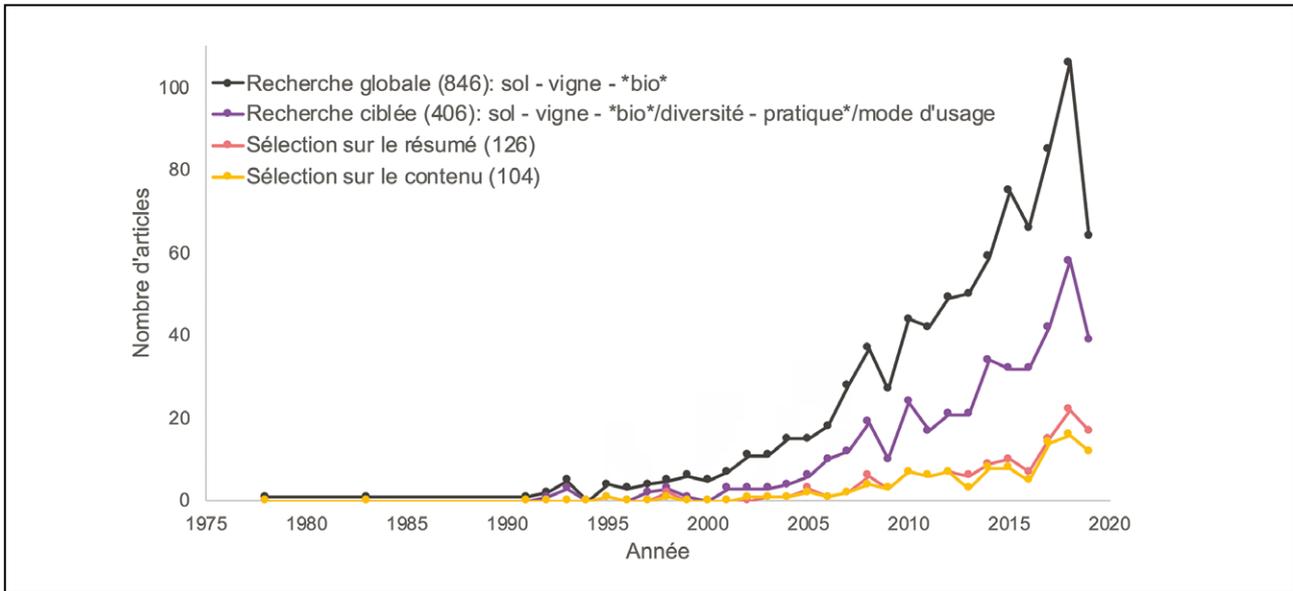
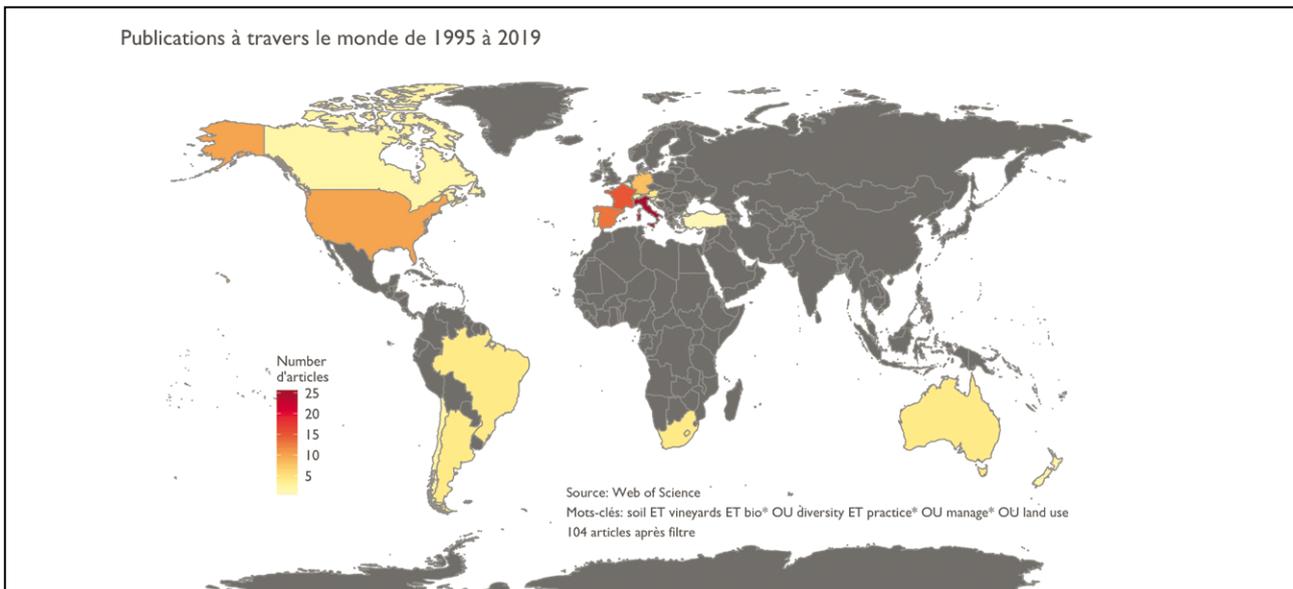


Figure 2 : Répartition géographique des sites d'étude considérés dans le corpus d'articles analysés.

Figure 2: Spatial distribution of sites which were studied in the reviewed articles.



publications. Ce classement est cohérent avec celui des producteurs de vins (OIV, 2019).

Analyse des stratégies expérimentales

Trois types de stratégies expérimentales ont été recensés dans les articles référencés :

- i- Les expérimentations en laboratoire: le sol d'un ou deux sites est prélevé, l'application de la modalité s'effectue en conditions contrôlées (en serres ou incubateur) et est découplée du contexte environnemental.
- ii- Les essais contrôlés *in situ*: un nombre restreint de sites est choisi (de 1 à 10) et toutes les modalités sont testées sur chaque site.
- iii- Les réseaux de parcelles: ces dispositifs sont ceux qui regroupent le plus grand nombre de sites (plusieurs dizaines). Les modalités ne sont pas contrôlées et les sites sont statistiquement agrégés selon les pratiques en vigueur.

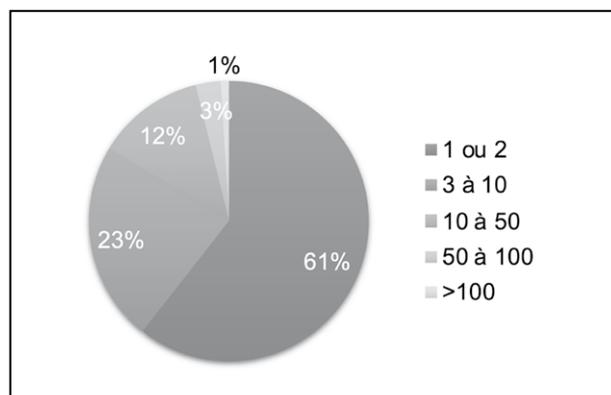
Les résultats de la plupart des articles du corpus ont été obtenus sur 1 ou 2 sites. En effet, 84 % des articles reposent sur des dispositifs expérimentaux avec moins de 10 sites, une quinzaine d'articles comptent plus de 10 sites, et seulement 4 plus de 50 (figure 3).

Certains sites ou réseaux de parcelles ont fait l'objet de plusieurs publications. Afin de ne pas surévaluer les résultats qui en sont issus, les publications mentionnant un seul et même site ou réseau de parcelles ont été considérées dans la présente synthèse comme une étude unique. Cinq cas ont été recensés :

- Berchidda (Italie), 2 parcelles, cité dans 10 articles ;
- Monterey (USA), 1 parcelle, cité dans 5 articles ;
- RMQS (France), entre 36 et 56 parcelles en vigne, cité dans 4 articles ;
- Pago Casa Gran (Espagne), 3 parcelles, cité dans 2 articles ;
- Maringa (Brésil), 2 parcelles cité dans 2 articles.

Figure 3 : Distribution des articles du corpus selon le nombre de sites étudiés.

Figure 3: Distribution of articles according their number of study sites.



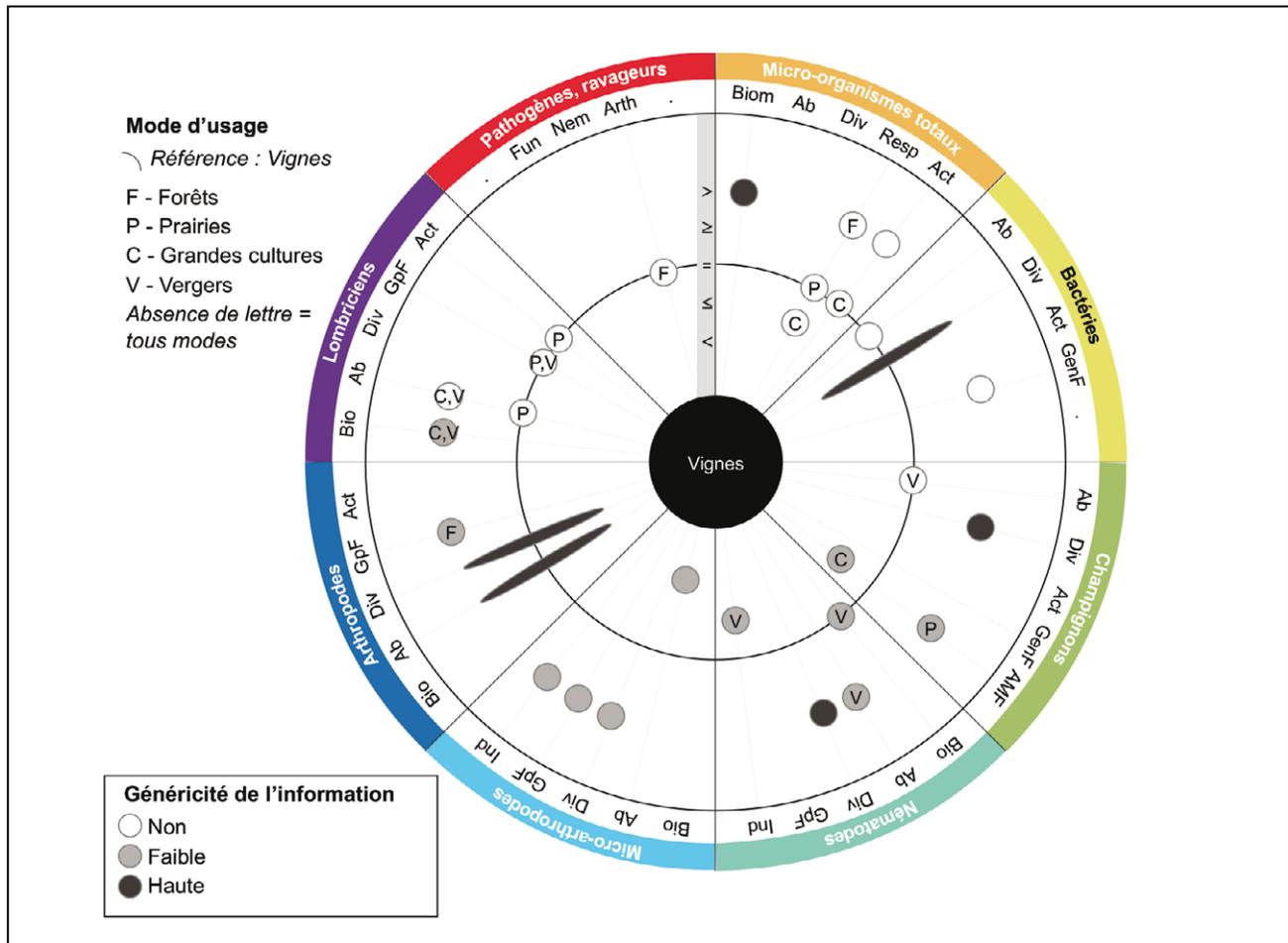
QUALITÉ BIOLOGIQUE DES SOLS VITICOLES : IMPACT DU MODE D'USAGE ET DU MODE DE PRODUCTION

Les sols viticoles sont connus pour être des sols généralement plus pauvres et moins fertiles que les autres sols (Joimel *et al.*, 2016) et, dans les plus anciennes régions viticoles (France, Italie, Espagne), si des vignes ont été historiquement plantées sur certains sols, c'est qu'ils étaient moins propices à d'autres usages. À ce titre, il nous est donc apparu nécessaire de faire dans un premier temps un bilan de la qualité biologique des sols en comparant l'usage viticole à d'autres modes d'usage agricole ou naturel (forêts, prairies). Dans un second temps, et avant de s'intéresser plus finement à l'impact des pratiques viticoles, nous présentons l'impact des modes de production sur la qualité biologique des sols. Même s'il existe de nombreux modes de production en système viticole, seulement trois sont suffisamment référencés dans la littérature pour être comparés. Il s'agit des modes de production conventionnelle, biologique et biodynamique. Il est important de préciser que ces modes de production diffèrent par certaines pratiques spécifiques, généralement liées à la protection phytosanitaire de la vigne, mais que d'autres peuvent être communes comme l'enherbement ou les pratiques de fertilisation.

Dans la suite de cet article, le bilan des connaissances pour chaque modalité est présenté sous forme d'une fiche synthétique. Cette fiche est constituée d'une figure regroupant l'information pour tous les groupes biologiques (une couleur par groupe). Cinq paramètres concernant le patrimoine biologique (Bio = Biomasse, Ab = Abondance, Div = Diversité) et l'état fonctionnel (Resp = Respiration, Act = Activité enzymatique, GenF = Gène Fonctionnel, AMF = taux de mycorhization, GpF = Groupes fonctionnels, Ind = Indices nématodes), sont à chaque fois représentés. L'état sanitaire, correspondant à la présence de pathogènes ou de ravageurs, constitue une partie distincte de la figure et est représenté en rouge. Lorsque le paramètre a été étudié pour la modalité, la position du point sur le rayon indique l'effet de la modalité par rapport à un traitement de référence choisi (indiqué au centre du cercle). L'état biologique obtenu dans le cas de ce traitement de référence est symbolisé par le cercle noir à mi-parcours entre le centre et la périphérie du diagramme. L'échelle renseigne la significativité de l'effet et peut prendre 5 positions : *Strictement supérieur* (>), *Supérieur ou égal* (≥), *Egal* (=), *Inférieur ou égal* (≤), *Strictement inférieur* (<). La position *Egal* signifie qu'il n'y a pas de différence entre les traitements, les positions *Strictement supérieur* ou *Strictement inférieur* signifient que toutes les études donnent le même résultat, les positions *Supérieur ou égal* et *Inférieur ou égal* signifient que selon l'étude, l'effet est significatif ou non. Dans le cas où le symbole n'est pas un point mais une ellipse, cela signifie que les résultats sont variables d'une étude à l'autre ou d'un contexte à l'autre et l'effet peut être positif, négatif ou non-

Figure 4 : Comparaison de la qualité biologique des sols de vigne et des autres modes d'usage.

Figure 4: Comparison of the vineyard soil biological quality to other land uses.



Références Tableau S1 : [4, 34, 38, 41, 42, 49, 52, 53, 64, 66, 75, 78-80, 87-90, 96, 97, 99, 116, 120, 122, 128].

significatif. La couleur du point indique le niveau de généralité du résultat : en blanc, le résultat n'est pas générique ; en gris clair, le résultat est caractérisé par une généralité faible ; en gris foncé, le résultat est générique.

Cette figure s'accompagne d'une introduction donnant les détails sur la modalité présentée, d'une synthèse des effets négatifs, de l'absence d'effet ou des effets positifs de cette modalité, et d'un bilan de l'impact de la modalité sur la qualité biologique du sol.

Qualité biologique des sols viticoles comparée aux autres modes d'usage

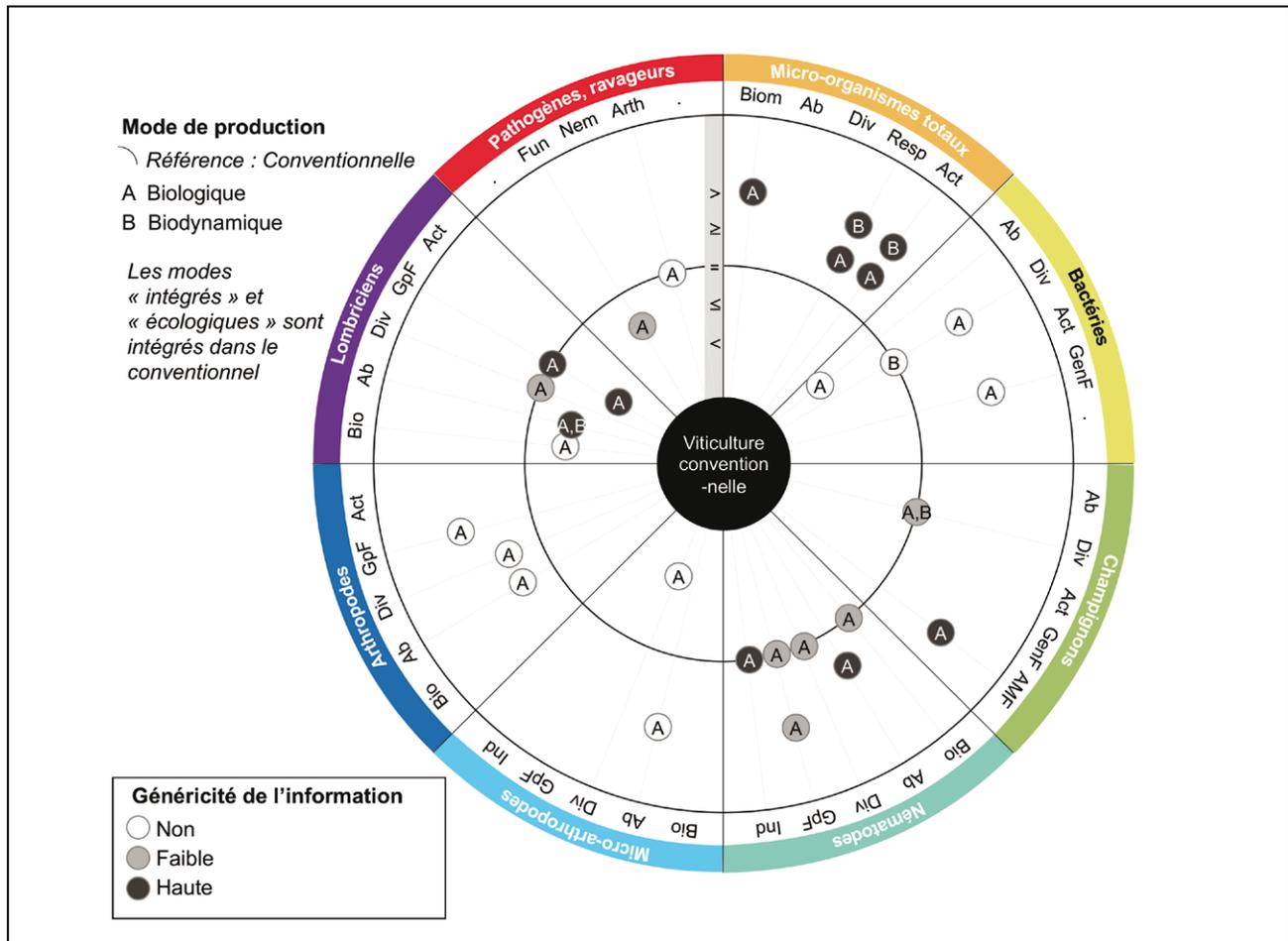
De nombreux paramètres biologiques ont été comparés entre les sols de vigne et les sols d'autres modes d'occupation du sol : Forêts, Prairies, Grandes Cultures, Vergers, Sites urbains, industriels ou miniers. Les sites urbains, industriels et miniers

étant très peu comparés aux sols de vigne, ils n'apparaissent pas dans cette synthèse.

- **Effets négatifs**: les biomasses microbienne et lombricienne ainsi que la diversité en champignons, nématodes et micro-arthropodes sont inférieures dans les sols viticoles, comparés aux sols d'autres modes d'usage. Les comparaisons de la diversité bactérienne ainsi que de l'abondance et de la diversité en arthropodes donnent des résultats très variables.
- **Pas d'effet**: bien que les résultats soient peu génériques, il semble que les activités microbienne et lombricienne des sols viticoles diffèrent assez peu de celles des autres sols agricoles (cultures annuelles ou prairies).
- **Effets positifs**: les sols viticoles présentent une abondance plus forte de micro-arthropodes (collemboles, acariens) que dans les autres modes d'usage. De plus, les mycorhizes y sont plus abondantes qu'en grandes cultures

Figure 5 : Comparaison de la qualité biologique des sols entre les différents modes de production viticoles.

Figure 5: Comparison of the soil biological quality between production systems



Références Tableau S1 : [17, 22, 27, 30, 34, 40, 44, 47, 48, 68, 70, 80, 87, 89, 91-94, 97, 99, 106, 107, 111, 115, 126].

- **Bilan :** globalement les sols viticoles présentent une qualité biologique inférieure ou égale à celle des autres sols bien que quelques groupes biologiques semblent y être favorisés. Ce bilan doit être objectivé par le fait que généralement les sols viticoles sont initialement peu productifs. Les vignes sont souvent implantées lorsque les conditions sont défavorables à d'autres cultures. Elles ont de faibles besoins nutritionnels et hydriques, les rendant capables de se développer sur des sols pauvres en matières organiques, peu profonds et avec une faible Réserve Utile, qui ont *de facto* une moins bonne qualité biologique.

Qualité biologique des sols viticoles en fonction du mode de production

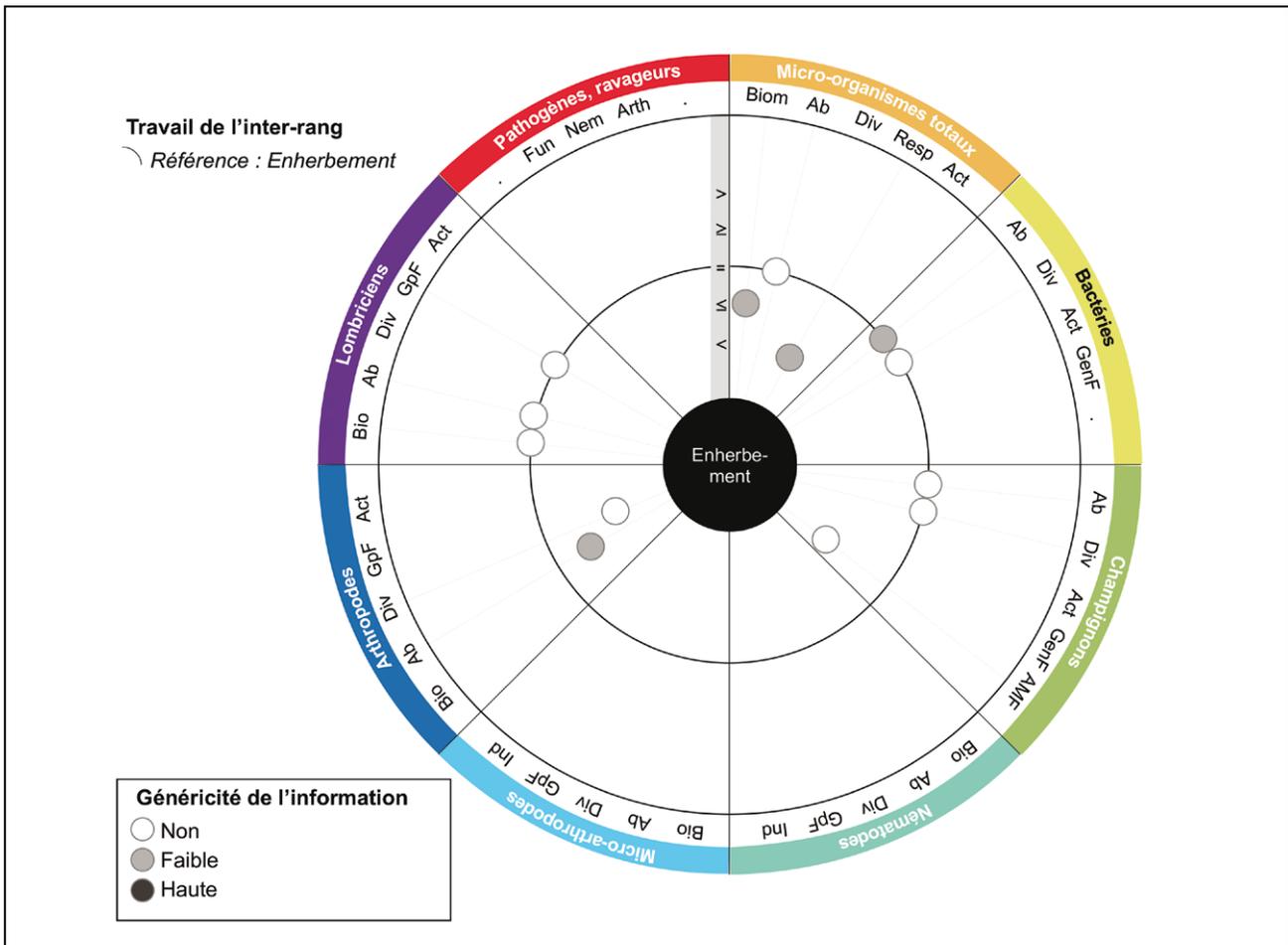
L'impact du mode de production a été étudié pour tous les groupes biologiques mais seuls les résultats sur les micro-

organismes, les nématodes et les lombrics présentent un bon niveau de généralité. Deux types de viticulture sont fréquemment comparés : conventionnelle et biologique. Même si elle est moins étudiée, la biodynamie est aussi présentée sur la *figure 5*. Pour chaque mode de production, le cahier des charges peut présenter une grande variabilité d'interprétation et d'adaptation selon la région et la situation pédo-climatique.

- **Effets négatifs :** les viticultures biologique et biodynamique affectent négativement les communautés lombriciennes, que cela soit en biomasse, en abondance totale ou pour les différents groupes écologiques.
- **Pas d'effet :** la diversité au sein de l'ensemble des groupes biologiques est équivalente quel que soit le mode de production. De plus les nématodes varient peu en biomasse et en indices de structure des communautés.
- **Effets positifs :** la biomasse, la respiration et l'activité microbienne sont plus importantes en viticulture biologique et

Figure 6 : Impact du travail de l'inter-rang sur la qualité biologique du sol.

Figure 6: Impact of tillage of inter-row on the soil biological quality.



Références Tableau S1 : Travail de l'inter-rang [14, 32, 39, 41, 51, 54, 55, 61, 62, 75, 78, 79, 82, 99] ; Age du dernier travail [54, 55, 82] ; Type de travail [51, 54] ; Autres modalités : [20, 106, 126].

biodynamique. Les mycorhizes sont favorisées alors que les champignons pathogènes sont moins présents. Les microarthropodes et les arthropodes ont également tendance à être plus abondants.

- **Bilan** : la viticulture biologique tend à favoriser la qualité biologique du sol, constat nuancé par l'impact négatif sur les vers de terre. De même, la viticulture biodynamique est favorable aux microorganismes mais délétère pour les vers de terre. La plus faible toxicité ou rémanence des pesticides et les amendements organiques en viticulture biologique pourraient expliquer la stimulation de la vie biologique des sols. L'impact négatif observé sur les vers de terre peut être lié à une intensification du travail du sol notamment pour remplacer le désherbage chimique par un désherbage mécanique.

IMPACT DES PRATIQUES VITICOLES SUR LA QUALITÉ BIOLOGIQUE DES SOLS

Les pratiques viticoles susceptibles d'agir sur la qualité biologique des sols se répartissent en quatre grandes thématiques qui sont le travail du sol, la couverture du sol, les traitements phytosanitaires et la fertilisation. Chacune de ces thématiques est étudiée à travers plusieurs modalités, plus ou moins documentées dans la littérature. Quelques articles mentionnent l'effet d'autres pratiques en lien avec l'irrigation ou avec la vigne elle-même. L'effet de quatre types d'irrigation sur les champignons phytopathogènes a été comparé : la submersion, le goutte-à-goutte, l'aspersion ou une combinaison des deux [Références Tableau S1 : 10, 73, 103]. Concernant la vigne, l'effet du choix du porte-greffe ou du cépage [Références Tableau S1 : 6, 94, 106] a été évalué sur la respiration et la biomasse

microbienne du sol. Ces résultats ne sont pas génériques et ne sont donc pas discutés dans la suite de cet article.

Ici, nous présentons une fiche de synthèse pour chacune des quatre grandes thématiques. À chaque fois, la figure présente la modalité pour laquelle les connaissances sont quantitativement les plus importantes et les plus génériques.

Impact du travail du sol

L'impact du travail du sol a été mesuré sur les communautés microbiennes et sur la macrofaune mais aucune référence n'a été trouvée pour la nématofaune et les microarthropodes (figure 6). Le travail dans l'inter-rang est généralement comparé à un inter-rang enherbé. La profondeur, l'outil et l'intensité du travail sont peu détaillés dans les articles. En conséquence, tous les types d'interventions sont regroupés dans cette modalité. Peu d'articles sur le travail du rang ont été recensés. L'effet du type de travail du sol, en lien avec l'outil utilisé et la profondeur d'action, a été uniquement étudié pour les microorganismes et les vers de terre. Le nombre de passage d'engins et la tonte ont été très peu étudiés. De façon générale, le niveau de généralité de l'information est faible voire absent.

- **Effets négatifs** : le travail de l'inter-rang affecte la biomasse et la respiration microbienne, l'abondance des mycorhizes ainsi que l'abondance et la diversité des arthropodes comparé à un inter-rang enherbé. Le type de travail influence la biomasse microbienne, avec un effet négatif croissant : Pas de travail (enherbement) > machine à bêcher = cultivateur > motoculteur rotatif.
- **Pas d'effet** : les diversités bactériennes, fongiques et les communautés lombriciennes ne semblent pas perturbées. Les vers de terre sont affectés de la même façon quel que soit le type de travail du sol (bineuse rotative avec travail sur axe horizontal jusqu'à 10 cm de profondeur, herse rotative avec travail sur axe vertical jusqu'à 10 cm de profondeur associée à un décompacteur ou décompacteur sur 15 cm de profondeur). Cependant tous ces résultats sont peu génériques.
- **Effets positifs** : le travail de l'inter-rang n'est favorable à aucun paramètre mesuré. Il semble que l'activité microbienne et l'abondance des vers de terre épi-anéciques soient stimulées par un travail récent.
- **Bilan** : le travail du sol dans l'inter-rang tend à dégrader la qualité biologique du sol, et ceci est d'autant plus significatif que l'intervention est récente. L'effet du type de travail du sol est variable selon les groupes biologiques. Ces résultats sont à considérer avec prudence étant donné le faible niveau de généralité qu'ils présentent.

Impact de la couverture des sols

L'enherbement est la principale couverture des sols étudiés. Peu d'informations sont disponibles sur l'effet du paillage. L'enherbement de l'inter-rang ou du rang, la durée

du couvert (temporaire, permanent), son origine naturelle ou semée ainsi que la composition du couvert semé (engrais verts, légumineuses, graminées, etc.) sont les modalités les plus renseignées. Seuls les résultats sur la durée du couvert sont génériques (figure 7).

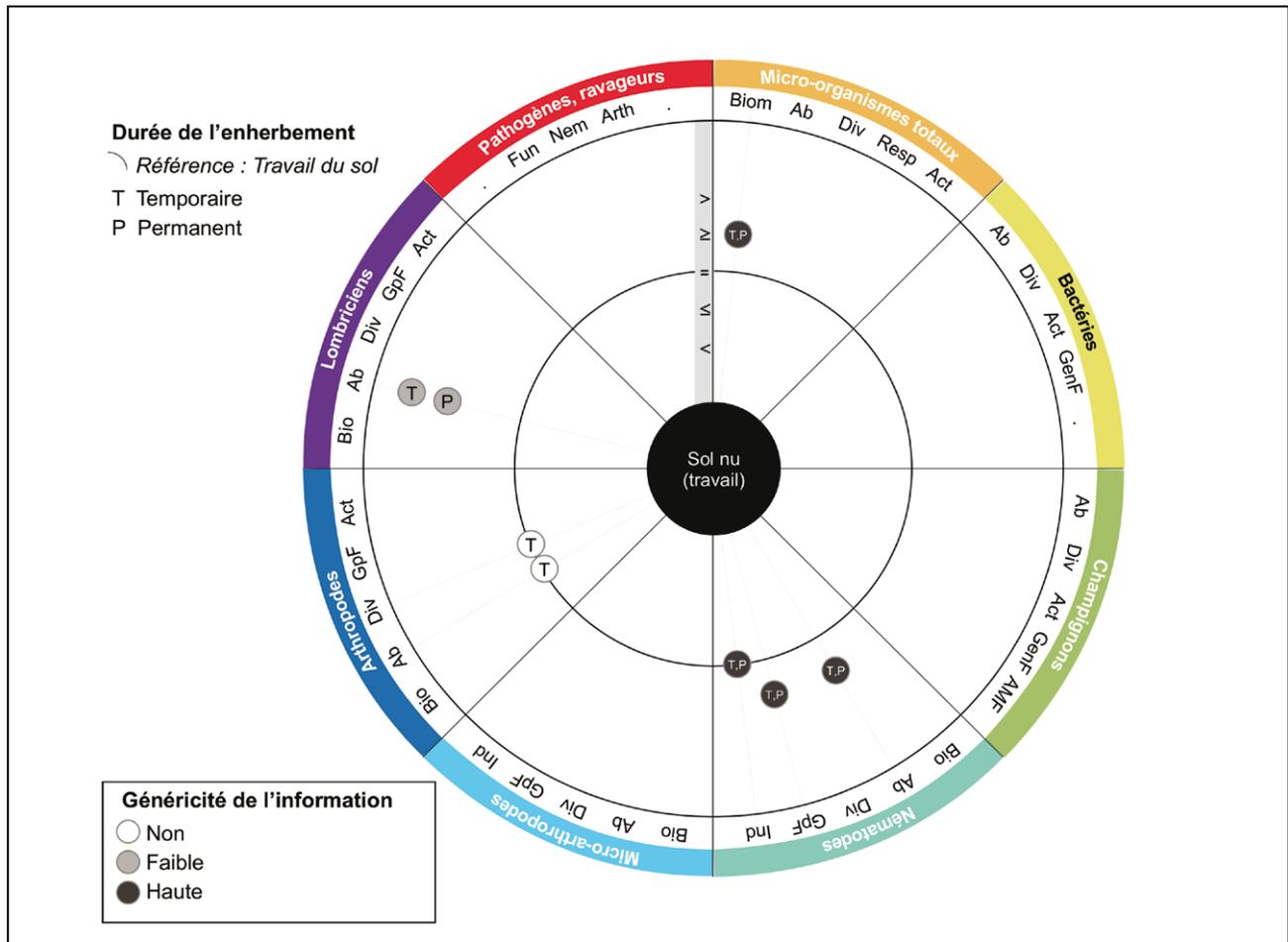
- **Effets négatifs** : l'enherbement de l'inter-rang a tendance à faire baisser la diversité fongique par rapport à un sol travaillé. Si le couvert est semé, la diversité bactérienne tend également à baisser comparée à un sol travaillé. L'effet d'un couvert semé sur l'activité microbienne et les groupes fonctionnels microbiens et d'arthropodes dépend de sa composition.
- **Pas d'effet** : l'enherbement du rang ou de l'inter-rang ne semble pas avoir d'impact sur l'activité microbienne ni sur les communautés bactériennes et fongiques. De même, le type de couvert semé n'a pas d'effet ni sur la biomasse ni la respiration microbienne. Les micro-arthropodes et arthropodes ne sont pas affectés par la présence d'un couvert, temporaire ou permanent.
- **Effets positifs** : la présence d'un couvert dans l'inter-rang, qu'il soit temporaire ou permanent, naturel ou semé, stimule la biomasse microbienne mais également l'abondance des nématodes et des vers de terre. Ces derniers répondent aussi favorablement à un enherbement du rang. L'enherbement total (rang + inter-rang) réduit les ravageurs, alors que l'effet sur les champignons phytopathogènes dépend de la composition du couvert dans l'inter-rang. Le paillage favoriserait l'abondance d'arthropodes et micro-arthropodes par rapport à un enherbement.
- **Bilan** : les pratiques qui visent à maintenir un enherbement du sol sont bénéfiques à l'ensemble des paramètres de la qualité biologique et de l'état sanitaire du sol. Quelles que soient les modalités de l'enherbement (temporaire ou permanent, naturel ou semé, composition du couvert), l'effet est neutre ou positif comparé à un sol travaillé. Certains résultats indiquent que le paillage pourrait avoir un effet bénéfique supérieur à un enherbement pour les arthropodes. Certains de ces résultats sont à prendre avec précaution car ils ne sont pas tous génériques.

Impact des traitements phytosanitaires

Deux aspects des traitements phytosanitaires sont abordés dans la littérature : le désherbage chimique et la protection de la vigne. Leur impact est principalement mesuré sur les paramètres microbiens. Le désherbage chimique est surtout étudié à travers l'utilisation du glyphosate (figure 8). Les modalités de protection de la vigne font l'objet de moins d'études et concernent la toxicité des traitements insecticides et fongicides (évaluée selon les critères de l'Organisation Internationale de la Lutte Biologique et Intégrée, OILB) et la dose de cuivre (6,8 vs 3,7 kg/ha/an pour l'expérimentation *in situ* et 250 vs 0 mg/kg de sol

Figure 7 : Impact d'un enherbement temporaire ou permanent sur la qualité biologique du sol.

Figure 7: Impact of plant cover duration (temporary or permanent) on the soil biological quality.

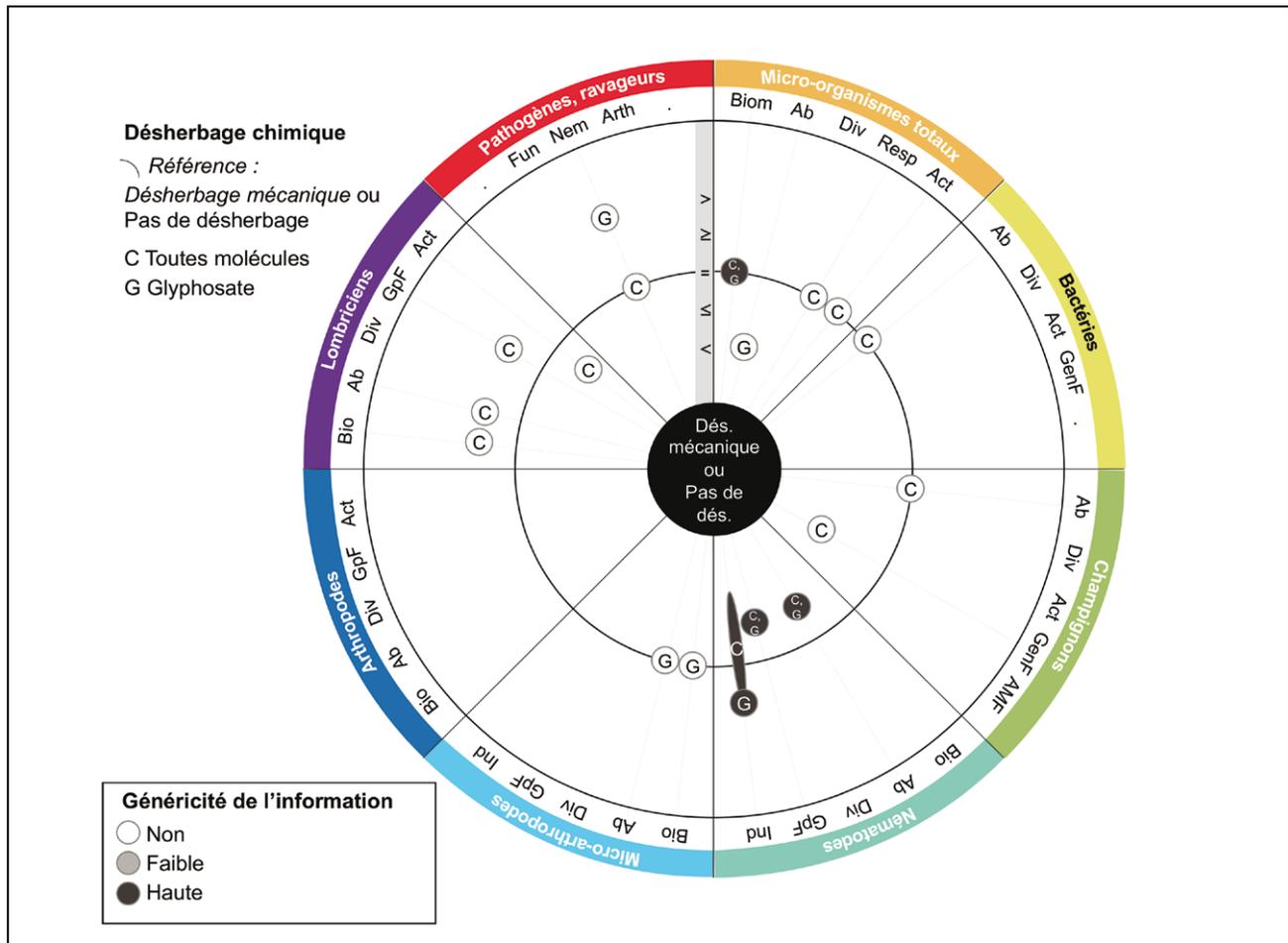


Références Tableau S1 : Enherbement [26, 32, 41, 76, 78, 79, 88, 89, 95, 100, 109, 108, 110, 118, 120, 124] ; Durée [60, 86, 87] ; Origine : [12, 15, 16, 53, 71, 76, 85, 117] ; Type de semis [10, 19, 38, 40, 55, 57, 71, 108, 109, 110] ; Couvert permanent [53, 105, 117] ; Paillage [38, 84, 113, 124]

pour l'expérimentation en laboratoire). De façon générale, la généricité de l'information est absente.

- **Effets négatifs** : le désherbage chimique semble avoir un effet néfaste sur les champignons mycorhiziens et l'activité des vers de terre. De plus, il affecte fortement l'abondance et la diversité des nématodes et stimule les parasites.
- **Pas d'effet** : les paramètres microbiens (biomasse, abondance, respiration, activité) ne diffèrent pas entre les différents types de désherbage.
- **Effets positifs** : les vers de terre semblent être favorisés par le désherbage chimique, en termes de biomasse et d'abondance, par rapport à un désherbage mécanique. D'autre part, les pesticides les plus toxiques limitent d'autant plus l'abondance des ravageurs.
- **Bilan** : le désherbage chimique et l'usage du glyphosate ont

un effet variable selon les paramètres biologiques. Alors qu'ils ont des conséquences négatives sur les nématodes (baisse de diversité et stimulation des parasites), la biomasse microbienne n'est pas affectée. Quelques résultats semblent indiquer que les vers de terre seraient favorisés par le désherbage chimique comparé à un désherbage mécanique. Bien que la question du désherbage chimique soit régulièrement traitée dans la littérature, peu d'alternatives au glyphosate sont testées. Concernant la protection de la vigne, l'impact de l'apport de cuivre est très variable selon le paramètre microbien mesuré et les résultats ne sont pas génériques du fait du faible nombre d'études ayant abordé la question. D'autre part les effets sur la qualité biologique du sol des modalités de lutte contre les bioagresseurs de la vigne sont très rarement investigués.

Figure 8 : Impact du désherbage chimique sur la qualité biologique du sol.**Figure 8:** Impact of chemical weeding on the soil biological quality

Références Tableau S1 : Désherbage chimique [25, 37, 60, 88, 100, 103] ; Glyphosate [25, 26, 60, 71, 117] ; Toxicité des pesticides/fongicides [101] ; Cuivre [104, 106] ; Autres : [28, 37, 53, 71, 99].

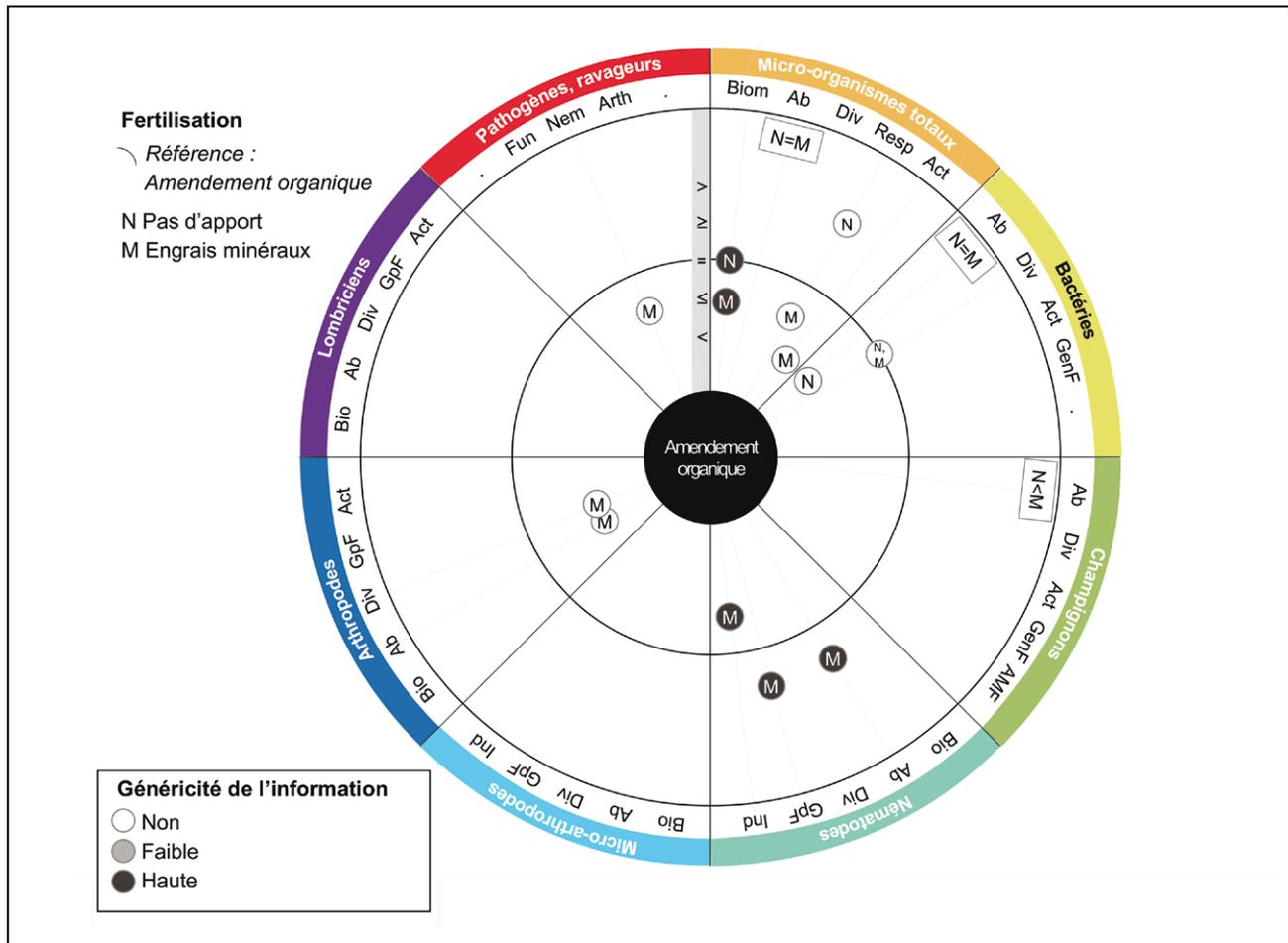
Impact de la fertilisation

L'impact des fertilisants organiques est plus étudié que celui des fertilisations minérales. Concernant les apports minéraux, la seule variable testée est la dose d'azote minéral, et l'étude a été peu concluante. Une large gamme de fertilisants organiques (fumier, engrais verts, compost de déchets verts multiples, vermicompost, compost, résidus de vinification) est testée dans les études et les résultats sont peu comparables et généralisables car ils présentent des spécificités locales importantes. L'apport de biochar et la restitution des sarments broyés et laissés en surface sont également testés. L'apport d'un fertilisant organique quel qu'il soit est la seule modalité pour laquelle les résultats sont génériques (figure 9). Les principaux paramètres biologiques renseignés concernent les microorganismes. L'apport de biostimulant a fait l'objet d'une seule étude peu générique ne mettant en évidence aucun effet significatif.

- **Effets négatifs :** l'abondance totale des nématodes et des différents groupes fonctionnels est négativement impactée par une fertilisation organique comparée à une fertilisation minérale et les nématodes parasites ont tendance à être favorisés.
- **Pas d'effet :** la biomasse microbienne et la diversité bactérienne sont similaires avec ou sans apport organique, cependant pour certains types de sol le fertilisant organique peut avoir un effet favorable comparé aux engrais minéraux. L'apport de biochar ne semble pas avoir d'effet avéré sur les paramètres biologiques mais les résultats sont peu génériques.
- **Effets positifs :** l'activité et la respiration microbienne ainsi que l'abondance et la diversité des arthropodes ont tendance à être stimulées par les fertilisants organiques comparées à une fertilisation minérale. L'abondance des bacté-

Figure 9 : Impact des grands types de fertilisation sur la qualité biologique des sols.

Figure 9: Impact of fertilization type on the soil biological quality.



Références Tableau S1 : Dose d'azote [15] ; Fertilisant organique [33, 60, 62, 65, 104, 107, 124] ; Type d'apport [7, 20, 28, 29, 33, 38, 43, 55, 104, 107] ; Sarments [20, 57, 124] ; Biochar [3, 7, 9] ; Biostimulant [107].

ries dans le sol est supérieure dans le cas d'une fertilisation organique que sans fertilisation. La restitution des sarments sur la parcelle stimule la biomasse, la respiration et l'activité microbienne des sols comparés à des engrais minéraux ou l'absence d'apport. Ces résultats manquent cependant de généralité.

- **Bilan** : il est difficile de conclure quant à l'effet de l'utilisation de fertilisants organiques comparés à des engrais minéraux car les effets sont très variables d'un produit à l'autre, d'un sol à l'autre et d'un paramètre biologique à l'autre. La restitution des sarments, apport organique local mais de qualité peu variable d'un vignoble à l'autre et d'une région viticole à l'autre, stimule la vie microbienne du sol.

HETEROGENEITE SPATIO-TEMPORELLE DE LA QUALITÉ BIOLOGIQUE DES SOLS VITICOLES

L'hétérogénéité temporelle est mesurée par la variabilité interannuelle [Références Tableau S1 : 6, 26, 33, 38, 43, 51, 69 : 71, 107, 100, 110, 113, 118], la variabilité saisonnière [Références Tableau S1 : 6, 14, 18, 26, 75, 79, 85, 90, 108, 109, 113, 117], l'effet de l'âge de la vigne [Références Tableau S1 : 45, 69] et de l'âge de conversion à la viticulture biologique [Références Tableau S1 : 44, 48, 92, 93]. Tous les paramètres de la qualité biologique du sol semblent varier au cours des saisons et d'une année à l'autre. L'effet de l'âge de la vigne est trop peu renseigné pour que son effet puisse être interprété. En revanche, les résultats indiquent que les nématodes et les vers de terre ne sont pas sensibles à l'âge de conversion (7, 11 ou 17 ans) en viticulture

biologique, alors que la biomasse et l'activité microbienne sont plus élevées dans les sols de vignes anciennement converties (après 17 ans de conversion pour la biomasse et 35 ans pour l'activité microbienne).

L'hétérogénéité spatiale a été étudiée à des échelles larges en comparant des territoires voire des régions ou pays, et l'impact des variations pédoclimatiques est souvent traduit en effet terroir ce qui limite l'interprétation due aux modes d'usage et aux pratiques viticoles. Dans cette synthèse, nous nous sommes focalisés sur une hétérogénéité spatiale plus fine à l'échelle de la parcelle comme la différence entre rang et inter-rang [Références Tableau S1 : 14,18, 27, 48, 71, 74, 80, 82, 85, 91, 94, 105, 106], la profondeur du sol (de 0 à 60 cm) [Références Tableau S1 : 27, 76, 91, 103, 105, 115, 116] et l'effet pente [Référence Tableau S1 : 111]. Malgré des gestions parfois différentes du rang et de l'inter-rang, les résultats montrent étonnamment peu de différence entre les deux localisations pour les nématodes, l'abondance et la diversité des bactéries et des champignons. En revanche, la biomasse microbienne est inférieure dans l'inter-rang. La respiration microbienne dans l'inter-rang est supérieure à celle dans le rang en viticulture biologique mais inférieure en viticulture conventionnelle. Il faut cependant noter que ces résultats sont peu génériques. La profondeur a été comparée à deux niveaux : 0 – 10 cm vs 10 – 20 cm et 5 – 30 cm vs 30 – 60 cm. La biomasse, la respiration et l'activité microbienne sont supérieures ou égales dans la couche 0 – 10 cm comparée à la couche 10 – 20 cm, alors que l'abondance des vers de terre et des groupes fonctionnels des nématodes ne varie pas. D'autre part, la comparaison des profondeurs 5 – 30 cm et 30 – 60 cm indique que la respiration microbienne, la nématofaune et l'abondance des vers de terre sont identiques, alors que la biomasse et l'activité microbienne, les diversités bactériennes et fongiques ainsi que les champignons mycorhiziens sont plus importants dans la couche supérieure. Globalement, les paramètres biologiques décroissent avec la profondeur du sol sur les 60 premiers centimètres. De plus, et de façon surprenante, il ne semble pas y avoir d'effet pente (4, 20, 25, 45 %) pour la biomasse, la respiration et l'activité microbienne.

DISCUSSION

Définition d'un itinéraire technique écologique

Le constat de notre synthèse bibliographique est que certains résultats obtenus dans la littérature scientifique internationale ne sont pas suffisamment génériques et que l'impact de certaines pratiques (irrigation, porte-greffe, implantation de la vigne) n'est pas encore bien étudié. Malgré tout, il apparaît pertinent de dégager un itinéraire technique viticole innovant pouvant être

plus vertueux pour la qualité biologique des sols, afin notamment de permettre à la profession d'orienter ses pratiques et de tester la durabilité économique de ces nouveaux systèmes ainsi que leur durabilité environnementale par des expérimentations spécifiques dans différents territoires.

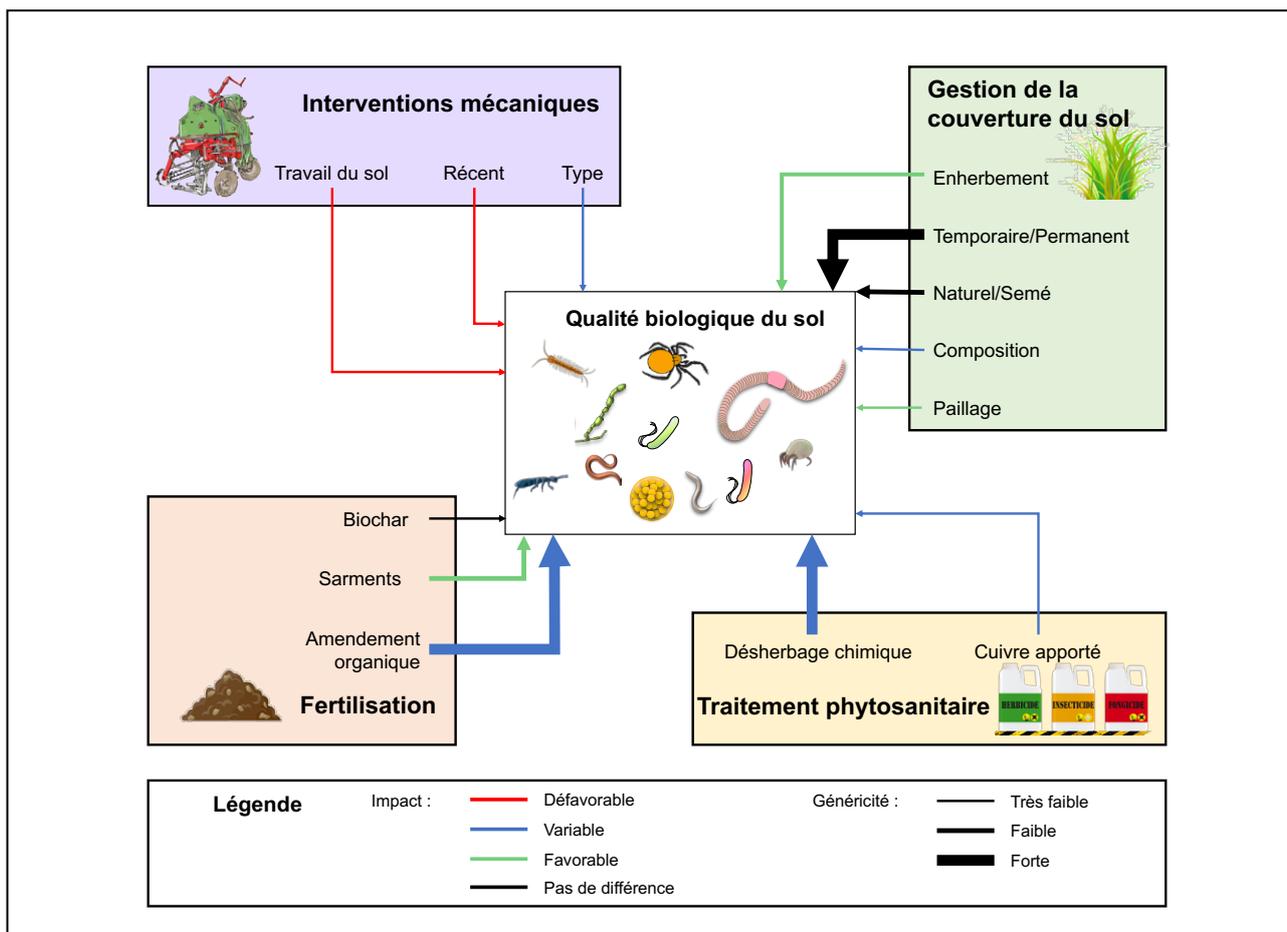
Sur la base de notre synthèse bibliographique (*figure 10*), nous pouvons conclure que la couverture des sols, par enherbement ou paillage, est une pratique stimulante pour la vie du sol. Cette pratique semble cohérente avec une démarche de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires de synthèse, favorable à la qualité biologique des sols comme le suggèrent l'impact plutôt négatif du désherbage chimique et la comparaison de la viticulture biologique à la viticulture conventionnelle. En contrepartie, le mode de production biologique s'accompagne généralement d'un désherbage mécanique. Or, tous types de travail du sol semblent défavorables à la vie du sol. Même si les effets de la fertilisation organique dépendent fortement des spécificités locales (type d'apport, type de sol), leur apport est toujours plus bénéfique qu'une fertilisation minérale. Les sarments sont le seul apport pour lequel un effet a été clairement identifié. Cet amendement, même s'il est d'origine locale, est le seul qui soit commun à toutes les vignes et facilement accessibles à tous les viticulteurs. Ainsi, restituer les sarments au sol au lieu de les brûler ou de les exporter constitue un atout pour l'amélioration de la qualité biologique des sols. Certains autres amendements peuvent stimuler la vie du sol, selon le type de sol. Le raisonnement d'un apport doit donc être envisagé et testé selon la disponibilité des produits et des contraintes pédoclimatiques locales.

Concernant les protections phytosanitaires, les études ciblées restent rares en vignes. Les modalités testées sont variables d'une étude à l'autre et les doses expérimentées sont rarement des doses réalistes pour un usage agronomique raisonné (cas du cuivre par exemple).

En conclusion et d'un point de vue théorique, l'itinéraire technique viticole qui couvrirait les sols de façon permanente et diversifiée, et par conséquent qui limiterait fortement le travail du sol, associé à une réduction significative des pesticides de synthèse et à une fertilisation organique intégrant pour partie la matière organique indigène comme les sarments de vigne, serait le plus vertueux par comparaison avec ceux qui existent actuellement. Ces préconisations sont à adapter au niveau local, en fonction des territoires, de la typicité des sols, du climat et des objectifs de production. L'enherbement doit se réfléchir selon la disponibilité des nutriments et de l'eau dans le sol et de la compétition avec la vigne. Le travail du sol est nécessaire pour certains types de sol. Le paillage et les amendements organiques dépendent des ressources disponibles localement et l'usage de pesticides et fongicides doit prendre en compte la pression parasitaire locale qui peut varier selon l'année et le climat. L'utilisation du cuivre pourrait aussi se faire au regard de l'historique d'utilisation de ce produit et de son accumulation

Figure 10 : Bilan de l'impact des pratiques viticoles sur la qualité biologique des sols.

Figure 10: State of knowledge on the impact of viticultural practices on the soil biological quality.



dans le sol. Si l'objectif est de mettre en place un itinéraire technique innovant, l'innovation se trouve justement dans la capacité à décliner et à adapter ce schéma vertueux global pour répondre au mieux aux contraintes locales.

Quelles pistes pour les recherches futures ?

Bien que l'effort de recherche autour de la question de la qualité biologique des sols viticoles s'intensifie depuis une quinzaine d'années, les données acquises aujourd'hui ne sont pas suffisantes pour conclure de façon robuste et générique sur l'état des sols viticoles et l'impact de toutes les pratiques associées. La recherche doit donc continuer à investir fortement sur les approches fondamentales et finalisées dans ce domaine pour, à terme, pouvoir intégrer pleinement la qualité biologique du sol comme levier d'action de l'évolution du modèle de production viticole vers une plus grande durabilité environnementale.

Bien que notre principal constat soit un manque de connaissances sur la plupart des thématiques en lien avec l'impact

des pratiques viticoles sur la qualité biologique des sols, certaines sont quand même plus renseignées que d'autres (figure 11). Cette synthèse met en évidence que les modes de production ou les différentes techniques de gestion des sols intégrant les techniques de travail du sol, la gestion de l'enherbement et le désherbage chimique sont les thématiques les plus abordées contrairement à celles abordant la toxicité écologique des pesticides (de synthèse ou non et autres que les herbicides), les techniques de fertilisation et d'implantation de la vigne.

Les thématiques orphelines

Les thématiques orphelines identifiées sont l'impact des pesticides de synthèse (autres que les herbicides), l'impact du cuivre aux doses d'utilisation actuelle dans un contexte de viticulture biologique, l'impact des différents types de fertilisation (organique vs minérale) et des différents types d'apport organique, l'impact des techniques d'implantation de la vigne, et la biodiversité du sol comme outil de biocontrôle.

L'écotoxicité des pesticides de synthèse sur la biologie des sols est une thématique totalement délaissée aujourd'hui puisque, à ce jour, le seul angle de gestion des molécules de phytoprotection est celui de la santé humaine. Mis à part de rares informations sur les organismes aquatiques, aucune information n'est disponible sur les impacts environnementaux, ni sur la biodiversité du sol, et encore moins dans les agrosystèmes viticoles.

Le cuivre, élément chimique naturel, pesticide très efficace et ne s'accompagnant pas de mécanismes de résistance, a été très largement utilisé depuis les années 70 et fait aujourd'hui débat dans les instances européennes. Les études considérées par ces instances pour préconiser son interdiction (à l'aube de 2025) du fait de sa toxicité et de son accumulation dans les sols remontent à plus de 20 ans. Mais ces résultats ne sont plus en adéquation avec l'utilisation actuelle du produit. Le cuivre est aujourd'hui utilisé à des doses maximales de 4 kg/ha/an en viticulture biologique alors que dans les années 80/90, les doses étaient 10 fois supérieures. Il est donc nécessaire de mener de nouvelles études afin d'objectiver les préconisations à venir sur l'impact réel de l'utilisation actuelle du cuivre en viticulture biologique.

La thématique du biocontrôle est encore trop négligée alors qu'elle est source de mesures prophylactiques. Elle est généralement abordée sur des notions d'interactions spécifiques ou pas entre le pathogène et son antagoniste. Or il a été démontré en santé humaine que la biodiversité et les équilibres microbiologiques du tube digestif sont un véritable rempart contre les organismes pathogènes (Das et Nair, 2019). Cette biodiversité constitue une garantie de bonne santé et de résistance à tous types de maladie y compris chroniques. Il serait pertinent d'envisager le même type de processus et de résistance au niveau du sol. Certaines pratiques viticoles ne perturberaient-elles pas les équilibres biologiques du sol et ainsi ne faciliteraient-elles pas l'implantation d'organismes nuisibles opportunistes ? Pour exemple, le mildiou de la vigne est un champignon du sol phytopathogène de la vigne et dont la génétique et la physiologie sont très bien connues. Toutefois, son écologie dans le sol et ses interactions avec les autres organismes (micro et macro) dans son habitat restent quasiment inexplorées. Une meilleure connaissance de son écologie pourrait contribuer à pouvoir le réguler, voire le piloter, dans le sol (par le choix des pratiques) avant qu'il ne s'exprime sur la vigne.

Enfin, un constat important est le manque de lien entre la qualité du sol et la qualité de la vigne et même la qualité du raisin et du vin. Bien que de récentes publications émettent des hypothèses sur ces liens, aucune démonstration n'a été faite pour le moment (Belda *et al.*, 2017 ; Chou *et al.*, 2018 ; Liu *et al.*, 2019). Ce manque de transversalité peut s'expliquer par la complexité d'une approche multidisciplinaire mais aussi par la nécessité de mieux connaître chaque domaine (écologie du sol,

écophysiologie et génétique de la vigne, œnologie...) avant de les croiser.

D'un point de vue plus global, le plus surprenant est que certaines de ces thématiques orphelines correspondent à de fortes interrogations de la profession et aussi de la société (riverains, citoyens et consommateurs) vis-à-vis des modes de production viticole. Ce décalage entre la recherche et les injonctions de la société est un frein pour alimenter les politiques publiques avec des résultats robustes et objectifs et pour orienter les modes de production vers des solutions plus durables, écologiquement et économiquement mais aussi socialement.

Les thématiques à consolider

Ajoutées à ces thématiques orphelines, certaines thématiques demandent un effort de consolidation pour gagner en généralité à des échelles globales (nationales et internationales) mais aussi à des échelles territoriales. Les thématiques concernées sont l'impact des modes de production, l'identification des techniques de travail du sol les plus adaptées, l'intérêt écologique des couverts végétaux et leur non-concurrence avec la vigne.

L'étude des modes de production viticole est souvent limitée à la comparaison des viticultures conventionnelle et biologique. Si la viticulture biologique repose principalement sur l'absence d'intrants de synthèse, les autres pratiques (enherbement, travail du sol, fertilisation organique) sont similaires aux autres modes de production. D'autres types de production viticole, supposés plus vertueux à l'échelle internationale (biodynamie) ou territoriale (HVE et Terra Vitis en France, Vinatura en Suisse, Lodi Rules en Californie, etc.), se caractérisent par des différences encore plus subtiles dans leurs pratiques et sont donc plus difficiles à tracer. La revue de la littérature indique qu'à ce jour aucun effort de recherche n'est engagé sur l'évaluation environnementale de ces nouveaux modes de production alternatifs.

Le travail du sol est généralement contradictoire avec le maintien d'un couvert végétal abondant et diversifié. Il est néfaste pour la biologie des sols dans tous les systèmes agricoles et il peut l'être d'autant plus dans les sols viticoles qui sont moins profonds, moins productifs, moins riches en matières organiques, plus caillouteux, plus soumis à l'érosion et donc plus vulnérables. Par conséquent, explorer l'ensemble des techniques de travail du sol (plus ou moins profond, rang vs inter rang, outils à dent ou à disques...) devrait permettre d'identifier celles qui sont les moins agressives dans un contexte viticole où il est encore nécessaire de désherber mécaniquement (moins de compétition hydrique, moins de gel tardif...).

Les techniques de couverture du sol sont déjà très largement étudiées. Toutefois, dans certains territoires ou régions du monde, cette pratique n'est pas concluante en raison d'une forte compétition hydrique ou nutritionnelle avec la vigne, de difficultés de gestion technique des couverts, de dérive des couverts, etc. Face à ce constat, deux axes de recherche pourraient être développés afin de mieux

comprendre les relations écologiques entre les différentes plantes et améliorer leur coexistence. A l'échelle de la parcelle, des approches phytosociologiques et d'écologie végétale peuvent permettre de prendre en compte les interactions végétales au sein du couvert et avec la vigne et ainsi d'implanter et de gérer les couverts de façon plus écologique. A l'échelle du paysage et du territoire, les stratégies d'enherbement peuvent être conçues en intégrant les typicités pédoclimatiques et écologiques des sols pour mieux ajuster les autres pratiques et les modes de conduite. Une meilleure connaissance de l'écologie des communautés vivant sur le sol et celles vivant dans le sol ainsi que sur leurs interactions, serait un atout pour tendre vers une gestion pérenne de l'écosystème viticole et pour développer des itinéraires techniques viticoles encore plus performants.

Amélioration des stratégies expérimentales pour gagner en généricité

Un constat fort de cette synthèse bibliographique est le manque de généricité de la plupart des résultats obtenus. Pour pallier ce manque, il est nécessaire de développer des dispositifs expérimentaux factoriels ou systémiques dédiés à l'étude de la biologie des sols dans différents territoires viticoles aux échelles nationale et internationale afin de capter l'hétérogénéité environnementale et agronomique de chaque région de production. Ces sites doivent être mis en place sur du moyen ou long terme car la dynamique des populations d'organismes, même si elle peut être rapide et réactive à des changements de pratiques à court terme, se structure et se stabilise souvent sur des temps plus longs, d'autant plus qu'en ce qui concerne la vigne où la plante est pérenne, l'impact à long terme est important à prendre en compte. Une telle approche permettrait aussi de relativiser l'impact des pratiques au regard des effets climatiques de millésimes atypiques. Enfin, le suivi à long terme est nécessaire pour intégrer les problématiques de changements climatiques, encore peu abordées sur la qualité biologique des sols viticoles.

Une alternative complémentaire pour combler le manque de généricité serait de s'appuyer sur les sciences participatives, approche émergente depuis une dizaine d'années et intégrant plus directement les viticulteurs et leurs parcelles au sein d'un réseau national (Cannavacciuolo *et al.*, 2017). Ces réseaux de parcelles présentent l'avantage d'être au plus près des innovations techniques des viticulteurs, mais aussi de capter toute l'hétérogénéité environnementale et agronomique d'un système de production s'ils comptent un nombre suffisant de parcelles. Si c'est le cas, lorsque des tendances sur l'impact d'une pratique sont identifiées, le résultat sera plus générique et plus robuste. Ces approches participatives permettent aussi de sensibiliser plus directement les viticulteurs à des problématiques environnementales et même de les former pour les rendre autonomes sur le sujet.

L'ensemble de ces pistes de recherche montre que le chemin est encore long pour que les approches écologiques prennent toute leur place dans la viticulture actuelle, encore très liée aux principes agronomiques classiques. Cependant, l'augmentation exponentielle du nombre d'études ces dernières années est un signe encourageant du développement des activités de recherche dans ce domaine et pour un transfert des connaissances acquises à la profession viticole à moyen terme.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude a été possible grâce au soutien financier du Plan National du Dépérissement du Vignoble (PNDV) et du Comité National des Interprofessions des Vins (CNIV). Merci aux membres du groupe de travail « Qualité biologique des sols viticoles » (animé par Laure Gontier, IFV, et Lionel Ranjard, INRAE) pour leur relecture et leurs commentaires. Nous souhaitons également remercier Thierry Heulin et un second lecteur anonyme d'avoir accepté de relire et d'évaluer cet article pour sa publication dans *Etude et Gestion des Sols*.

BIBLIOGRAPHIE

- AGRESTE, 2013 - Enquête sur les pratiques culturales en viticulture 2013
- Baumann K., Dignac M. F., Rumpel C., Bardoux G., Sarr A., Steffens M., & Maron, P. A., 2012 - Soil microbial diversity affects soil organic matter decomposition in a silty grassland soil. *Biogeochemistry*, 114(1-3), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9800-6>
- Belda I., Zorraoinandia I., Peris M., Palacios A., & Acedo A., 2017 - From vineyard soil to wine fermentation: Microbiome approximations to explain the "terroir" Concept. *Frontiers in Microbiology*, 8(MAY), 1-12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00821>
- Belmonte S. A., Celi L., Stahel R. J., Bonifacio E., Novello V., Zanini E., & Steenwerth K. L., 2018 - Effect of Long-Term Soil Management on the Mutual Interaction Among Soil Organic Matter, Microbial Activity and Aggregate Stability in a Vineyard. *Pedosphere*, 28(2), 288-298. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60015-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60015-3)
- Cannavacciuolo M., Cassagne N., Riou V., Mulliez P., Chemidlin N., Dequiedt S., ... Ranjard L., 2017 - Validation d'un tableau de bord d'indicateurs sur un réseau national de fermes en grande culture et en viticulture pour diagnostiquer la qualité biologique des sols agricoles. *Innovations Agronomiques*, 55, 13. Retrieved from https://www.ofsv.org/images/documentations/AGRINNOV_diagnostic_qualité_biologique_des_sols.pdf
- Chou M. Y., Vanden Heuvel J., Bell T. H., Panke-Buisse K., & Kao-Kniffin J., 2018 - Vineyard under-vine floor management alters soil microbial composition, while the fruit microbiome shows no corresponding shifts. *Scientific Reports*, 8(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29346-1>
- Coll P., Le Cadre E., Blanchart E., Hinsinger P., & Villenave C., 2011 - Organic viticulture and soil quality: A long-term study in Southern France. *Applied Soil Ecology*, 50(1), 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.013>
- Costantini E. A. C., Castaldini M., Diago M. P., Giffard B., Lagomarsino A., Schroers H. J., ... Zombaro A., 2018 - Effects of soil erosion on agro-ecosystem services and soil functions: A multidisciplinary study in nineteen organically farmed European and Turkish vineyards. *Journal of Environmental Management*, 223(February), 614-624. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.065>

- Das B., & Nair G. B., 2019 - Homeostasis and dysbiosis of the gut microbiome in health and disease. *Journal of Biosciences*, 44(5), 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12038-019-9926-y>
- Dequiedt S., Saby N. P. a, Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., ... Ranjard L., 2011 - Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. *Global Ecology and Biogeography*, 20(4), 641-652. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00628.x>
- FAO., 2015 - La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2015 (SOFA): Protection sociale et agriculture: Briser le cercle vicieux de la pauvreté rurale.
- Joimel S., Cortet J., Jolivet C. C., Saby N. P. A., Chenot E. D., Branchu P., ... Schwartz C., 2016 - Physico-chemical characteristics of topsoil for contrasted forest, agricultural, urban and industrial land uses in France. *Science of the Total Environment*, 545-546, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.035>
- Joimel S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota S., Krogh P. H., Nahmani J., ... Cortet J., 2017 - Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Science of the Total Environment*, 584-585, 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>
- Le Guillou C., Angers D. A., Maron P. A., Leterme P., & Menasseri-Aubry S., 2012 - Linking microbial community to soil water-stable aggregation during crop residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 50, 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.03.009>
- Liu D., Zhang P., Chen D., & Howell K., 2019 - From the Vineyard to the Winery: How Microbial Ecology Drives Regional Distinctiveness of Wine. *Frontiers in Microbiology*, 10(November), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02679>
- OIV., 2019 - 2019 Statistical Report on World Vitiviniculture. 2019 Statistical Report on World Vitiviniculture, 23. [https://doi.org/64/19/6835 \[pii\]n10.1158/0008-5472.CAN-04-1678](https://doi.org/64/19/6835 [pii]n10.1158/0008-5472.CAN-04-1678)
- Quiquerez A., Brenot J., Garcia J.-P., & Petit C., 2008 - Soil degradation caused by a high-intensity rainfall event: Implications for medium-term soil sustainability in Burgundian vineyards. *Catena*, 73(1), 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.09.007>
- Ruiz-Colmenero M., Bienes R., Eldridge D. J., & Marques M. J., 2013 - Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *Catena*, 104, 15-160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.007>
- Tardy V., Mathieu O., Lévêque J., Terrat S., Chabbi A., Lemanceau P., ... Maron P. A., 2014 - Stability of soil microbial structure and activity depends on microbial diversity. *Environmental Microbiology Reports*, 6(2), 17-183. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12126>
- Van Leeuwen C., Roby J. P. & De Ressaiguier L., 2018 - Soil-related terroir factors: A review. *Oeno One*, 52(2), 17-188. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.2.2208>
- Vivant A. L., Garmyn D., Maron P. A., Nowak V., & Piveteau P., 2013 - Microbial Diversity and Structure Are Drivers of the Biological Barrier Effect against *Listeria monocytogenes* in Soil. *PLoS ONE*, 8(10), 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076991>
- Wezel A., Bellon S., Doré T., Francis C., Vallod D., & David C., 2009 - Agroecology as a science, a movement and a practice. *Sustainable Agriculture*, 2, 27-43. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_3

Information supplémentaire :

Tableau S1 : Liste des références bibliographiques issues de la littérature internationale et alimentant la synthèse.

Table S1: List of bibliographical references from the international literature that contribute to the synthesis

Téléchargeable sur :

https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/06/EGS_2020_Karimi_tableauS1.xlsx

