



INRAE



Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles

Résumé de l'expertise scientifique collective – Octobre 2022

Dans le contexte d'après-guerre, l'avènement des engrais et des pesticides de synthèse a permis aux agriculteurs de spécialiser leurs exploitations autour des cultures les plus rentables sur le plan économique, en s'affranchissant des contraintes biotiques (pressions exercées par les ennemis des cultures) et abiotiques (fertilité des sols, variabilité climatique, etc.). Si cette transformation de l'agriculture a servi la hausse des niveaux de production, elle a induit une perte progressive de diversité végétale tant cultivée (s'accompagnant d'un raccourcissement des rotations et d'une uniformisation des parcelles) que semi-naturelle (suppression des haies au profit de l'agrandissement des parcelles). Les impacts environnementaux et sanitaires de ce modèle dominant, ainsi que son interrelation avec les changements globaux majeurs (changement climatique, érosion de la biodiversité, changements d'utilisation des sols), sont désormais bien établis par la communauté scientifique¹. Face à ces enjeux, la France comme l'Europe voient se développer une demande sociétale forte pour une agriculture permettant de satisfaire les besoins alimentaires de façon plus respectueuse de l'environnement et de la santé humaine, et moins dépendante des intrants de synthèse.

Cette demande est relayée par un ensemble de politiques publiques européennes (Pacte vert pour l'Europe, Politique agricole commune) et nationales (plan Ecophyto, loi d'Avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt) qui fixent des objectifs de réduction de l'usage des pesticides et des risques associés, et promeuvent plus globalement une transition vers des systèmes agricoles remplaçant la biodiversité et les processus écologiques au cœur des facteurs de production. Cependant, malgré la prise en compte croissante des enjeux environnementaux dans les politiques publiques, force est de constater que la transition vers des systèmes de culture plus économes en pesticides est loin d'être suffisamment avancée pour atteindre les cibles fixées (Guyomard et al., 2020). De plus, si la diversification végétale est considérée dans les arènes politique et scientifique comme un levier majeur de cette transition, on manque de recul critique et de vision d'ensemble quant à son efficacité « au champ », notamment pour protéger les cultures. Enfin, la diversification végétale recouvre une très large gamme de situations et de pratiques ; si certaines sont déjà bien connues et déployées par une partie des agriculteurs (par exemple l'utilisation de mélanges variétaux), d'autres sont plus confidentielles (par exemple l'agroforesterie en milieu tempéré) et bon nombre sont perçues par certains acteurs – à tort ou à raison – comme peu efficaces ou trop contraignantes.

C'est dans ce contexte que les ministères en charge de l'agriculture, de l'environnement et de la recherche ont saisi INRAE fin 2019 pour réaliser une expertise scientifique collective (ESCo) évaluant l'efficacité de stratégies de protection des cultures fondées sur la diversification végétale. Il s'agissait également d'analyser les freins et les leviers du déploiement de telles stratégies. Cette demande s'inscrit dans le cadre du plan Ecophyto 2+ et alimente le Programme Prioritaire de Recherche (PPR) « Cultiver et protéger autrement » qui invite la recherche à concevoir des systèmes de culture sans pesticides de synthèse.

Réalisée par un comité pluridisciplinaire d'experts, l'analyse de près de 2 000 références scientifiques internationales montre sans ambiguïté qu'augmenter le niveau de diversité végétale des parcelles et des paysages contribue efficacement à la régulation des bioagresseurs des cultures. Par ailleurs, les systèmes diversifiés présentent en moyenne de plus hauts niveaux de biodiversité associée et fournissent davantage de services écosystémiques à la société. Si la plupart de ces systèmes permettent d'atteindre des rendements plus élevés et/ou plus stables que les systèmes moins diversifiés (notamment en système bas intrants), leur adoption est limitée par de nombreux verrous à tous les niveaux des filières agricoles en amont et en aval de la production. Ils peinent souvent à dégager une rentabilité à l'échelle de l'exploitation, notamment parce que les intérêts écologiques de la diversification végétale s'expriment sur le long terme, et en partie au-delà des limites de l'exploitation agricole (préservation de la biodiversité, contribution à l'atténuation du changement climatique, etc.). Les politiques publiques apparaissent ainsi comme un levier central pour inciter et accompagner le développement de la diversification végétale.

La démarche d'Expertise scientifique collective à INRAE

L'Expertise scientifique collective (ESCo) est une activité d'expertise institutionnelle développée par INRAE depuis le début des années 2000, et conduite par la Direction de l'Expertise scientifique collective, de la Prospective et des Études (DEPE). Elle consiste à réaliser une synthèse critique de la littérature scientifique internationale en réponse à une question de nature sociétale, afin d'éclairer l'action publique, sans toutefois formuler d'avis ni de recommandations. Les ESCo sont conduites dans le respect de principes garantissant la robustesse de leurs conclusions² : compétence et pluralité du comité d'experts, impartialité, transparence de la méthode et traçabilité du processus de travail mis en œuvre.

La présente ESCo a été réalisée par un collectif pluridisciplinaire d'une trentaine d'experts et de contributeurs scientifiques d'origines institutionnelles diverses, issus de disciplines complémentaires (écologie, économie, agronomie, génétique, sciences de gestion, droit, etc.). Leur travail a été animé par une cheffe de projet et deux responsables scientifiques. Les experts ont analysé un corpus de près de 2 000 références constitué par des professionnels de l'information scientifique (essentiellement des articles scientifiques publiés dans des revues internationales à comité de lecture, auxquels se sont ajoutés des rapports d'étude, des ouvrages et de la littérature juridique). Cet exercice produit un rapport qui rassemble les contributions des experts et la bibliographie citée, et une synthèse plus vulgarisée à l'usage notamment des décideurs et de l'ensemble de la société.

¹ Par exemple les Expertises scientifiques collectives INRAE-Ifrermer sur les impacts écotoxicologiques des pesticides (Leenhardt et al., 2022) et Inra sur les synergies entre agriculture et biodiversité (Le Roux et al., 2008), ainsi que les travaux de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

² <https://www.inrae.fr/actualites/quels-principes-inrae-conduit-il-expertise-ou-etude-scientifique-collective>

Diversification végétale et régulation naturelle des bioagresseurs : définitions

Une large gamme de pratiques de diversification végétale

La diversification concerne à la fois la **végétation cultivée par l'agriculteur** (plantes annuelles ou pérennes cultivées à des fins de production de biomasse ou de services écosystémiques) et la **végétation semi-naturelle** associée aux espaces agricoles (végétation spontanée présente au sein des parcelles et du paysage, le plus souvent composée d'espèces bisannuelles, pluriannuelles ou pérennes). Le champ de l'ESCO couvre toutes les échelles spatiales et temporelles auxquelles il est possible de considérer la diversité végétale. Ainsi, l'analyse porte sur une large gamme de pratiques de diversification, ces pratiques pouvant être combinées (Fig. 1).

À l'échelle de la parcelle, il s'agit d'augmenter la diversité intra-spécifique du couvert cultivé (en utilisant des **mélanges variétaux** de semences certifiées ou des **variétés traditionnelles ou paysannes**) ou sa diversité inter-spécifique (en semant des **cultures associées**, en installant

des **plantes de services** durant le cycle de vie de la culture ou en mettant en place un système **agroforestier**). La diversification de la végétation s'inscrit également dans le temps, *via* un allongement des **rotations** (par exemple introduction d'une nouvelle culture) ou l'implantation de **couverts végétaux en période d'interculture**.

À l'échelle **supra parcellaire** (exploitation et au-delà), l'ESCO considère la diversité du paysage, tant dans sa dimension cultivée (nature des cultures présentes dans l'**assolement**, **taille des parcelles**) que semi-naturelle (nature des **bordures de parcelles**, connectivité des **haies**, présence de **jachères**, de **prairies permanentes**, de bosquets, *etc.*). À noter que la diversité du paysage agricole résulte largement de choix individuels rarement coordonnés : la nature et la répartition des cultures dans le paysage découle des choix d'assolement et de rotation des agriculteurs ; la densité de végétation semi-naturelle est liée à la taille des parcelles.

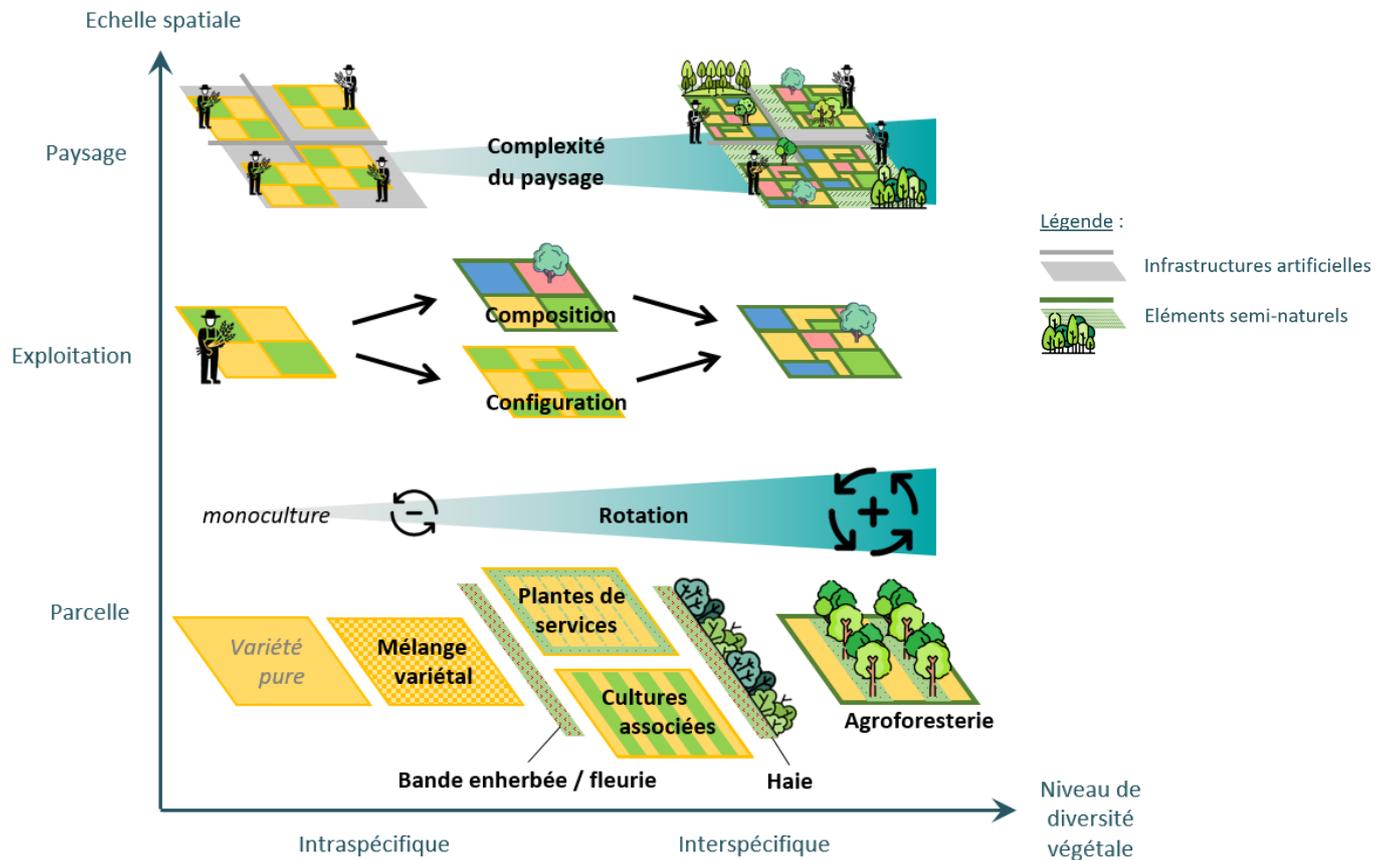


Figure 1. Représentation schématique des modalités de diversification végétale considérées dans l'ESCO

La régulation naturelle des bioagresseurs des cultures : un changement de paradigme

Différentes catégories d'organismes dits « bioagresseurs » sont susceptibles de causer des dégâts (symptômes observables sur les plantes) sur les plantes cultivées : **arthropodes phytophages** (insectes, acariens, *etc.*), **plantes adventices** (repousses de cultures et plantes spontanées) ou **parasites, micro-organismes pathogènes**

(champignons, bactéries, virus, *etc.*) à l'origine des maladies des plantes, **gastéropodes**, **nématodes**, **vertébrés**. Selon leur nature, les dégâts peuvent entraîner des pertes quantitatives ou qualitatives de récolte (dommages), et, au final, des pertes économiques pour l'agriculteur.

Différentes stratégies de protection des cultures (curatives et préventives) sont mises en œuvre pour empêcher ou réduire les pertes de récolte. La stratégie aujourd'hui dominante repose sur la **lutte chimique pour maîtriser les bioagresseurs**, la plupart du temps en combinaison avec l'**utilisation de variétés peu sensibles voire résistantes aux maladies**, et certaines méthodes de **lutte dite culturale** (choix de la rotation des cultures et de la densité de semis, travail du sol).

La **protection agroécologique des cultures** donne quant à elle la priorité aux **mesures préventives pour réguler les populations de bioagresseurs**. Pour ce faire, elle s'appuie sur la biodiversité (végétale et animale) et le fonctionnement naturel de l'écosystème agricole. En principe, cette

régulation naturelle des bioagresseurs repose essentiellement sur le fait qu'un même bioagresseur ne peut consommer / coloniser toutes les plantes cultivées du fait de sa spécialisation plus ou moins marquée vis-à-vis de ces plantes. De ce fait, **une augmentation de la diversité végétale « dilue » la plante hôte du bioagresseur dans un couvert végétal ou un paysage de plantes non hôtes** : les bioagresseurs phytophages ont ainsi plus de difficultés à trouver leur plante hôte (régulation dite *bottom-up*). Pour les plantes adventices, un couvert végétal diversifié constitue un environnement plus concurrentiel. S'ajoute à cela **l'intervention des ennemis naturels des bioagresseurs** (régulation dite *top-down*), dont la présence dépend des ressources et habitats que peut leur offrir la végétation intra et extra-parcellaire durant leur cycle de vie.

La diversification végétale est un levier pour protéger les cultures

Les effets des différentes modalités de diversification végétale sur les populations de bioagresseurs sont synthétisés dans le Tableau 1. Chaque case présente la tendance majoritaire qui se dégage de la littérature analysée. **La revue bibliographique montre que chaque**

catégorie de bioagresseurs peut être régulée par au moins une modalité de diversification. Dans la majorité des cas, la littérature fait consensus sur l'effet positif de la diversité végétale. Toutefois, le niveau de consensus scientifique est variable selon les modalités de diversification.

Tableau 1. Synthèse des effets des différentes modalités de diversification végétale sur les différentes catégories de bioagresseurs

	Adventices	Insectes aériens	Insectes du sol	Maladies vectorielles	Pathogènes aériens	Pathogènes du sol	Nématodes	Autres bioagresseurs*
Mélanges variétaux	+	?	?	?	?	?	?	?
Cultures associées	?	?	?	?	?	?	?	?
Agroforesterie	?	?	?	?	?	?	?	? 
↗ diversité rotations	?	?	?	?	?	?	?	?
↘ part d'une culture / paysage	?	?	?	+		?	?	? 
↗ diversité de l'assolement	?	?	?	+		?	?	?   
↘ taille des parcelles	?	?	?	+/-			+/-	?
↗ distance entre cultures	+/-	?	+	+			+	?
↗ éléments semi-naturels	+	?	?	?			?	?  +

Légende :

* Pictogrammes de gauche à droite et de haut en bas : Striga, gastéropodes, campagnol, araignées, chauves-souris, oiseaux, acariens.

** Le niveau d'intensité de la couleur traduit le niveau de consensus de la littérature (plus la couleur est foncée, plus le consensus est fort).

	Consensus** de la littérature en faveur d'un effet positif sur la régulation du bioagresseur (= la modalité de diversification végétale fait diminuer la population du bioagresseur)
	Absence de consensus de la littérature : effet ambigu
	Consensus** de la littérature en faveur d'un effet négatif sur la régulation du bioagresseur (= la modalité de diversification végétale favorise la pullulation du bioagresseur)
	Pas d'effet significatif sur le bioagresseur
	Hypothèse théorique sur le sens de l'effet (indiqué en italique) sans preuves empiriques + : <i>effet attendu positif</i> ; - : <i>effet attendu négatif</i> ; +/- : <i>effet attendu ambigu</i>
?	Information insuffisante pour conclure (y compris sur le plan théorique)

La littérature est plus fournie sur les modalités de diversification végétale à l'échelle de la parcelle (mélanges de variétés, associations de cultures, rotations), pour lesquelles elle rapporte des effets majoritairement positifs sur la régulation des bioagresseurs (cases vertes). Les effets du paysage cultivé (diversité des assolements) et non cultivé (éléments semi-naturels) font quant à eux essentiellement l'objet d'attendus théoriques mais non testés expérimentalement (cases bleues). La littérature suggère que l'arrangement spatial du paysage (taille des parcelles et répartition des cultures) a un effet au moins aussi important que celui de sa composition (diversité des espèces cultivées et semi-naturelles).

Les adventices sont principalement régulées par les couverts cultivés plurispécifiques (cultures associées, agroforesterie) et les rotations. Les insectes ravageurs peuvent être régulés par toutes les modalités de diversification intra-parcellaire (notamment les cultures associées) ainsi que par une augmentation de la diversité de la végétation cultivée dans le paysage. Concernant les maladies des cultures, la littérature porte essentiellement sur les agents pathogènes aériens associés aux céréales à paille (blé, orge, avoine, riz). Ces derniers peuvent être régulés principalement par les mélanges variétaux, les rotations et, dans une moindre mesure, par les associations de cultures. Les autres types de bioagresseurs sont beaucoup moins étudiés, à l'exception notable des nématodes qui sont régulés par certaines rotations.

Si la littérature s'accorde sur l'effet régulateur de la diversité végétale, les cas d'inefficacité (voire d'effet adverse) existent. Outre les gastéropodes favorisés par les systèmes agroforestiers (case rouge), des travaux relatant des effets négatifs existent pour l'ensemble des modalités de diversification. Pour certains couples « modalité de diversification – catégorie de bioagresseurs » (par exemple

diversification de la végétation semi-naturelle – insectes aériens), ils sont aussi nombreux que les effets positifs, empêchant de dégager un consensus clair (cases jaunes). Ces ambiguïtés s'expliquent essentiellement par la dépendance des effets au contexte des cas analysés :

- les résultats dépendent souvent des traits de vie des organismes en jeu (capacité et mode de dispersion, spécialisation d'hôte, formes de résistance, etc.), empêchant toute généralisation de l'effet constaté sur un taxon à l'ensemble d'une catégorie de bioagresseurs ;
- les pratiques agricoles sont un facteur majeur de variabilité des effets. La littérature suggère notamment que la mise en œuvre de pratiques conventionnelles (utilisation d'intrants de synthèse et de variétés adaptées à ce mode de conduite) est susceptible d'amoindrir les effets de régulation permis par la diversité végétale. On constate d'ailleurs souvent des effets positifs plus marqués en systèmes bas intrants ;
- les conditions climatiques locales et saisonnières sont systématiquement évoquées comme pouvant modifier l'expression des mécanismes naturels.

Ainsi, il n'est pas possible de tirer des règles générales dictant quelle modalité de diversification végétale déployer pour réguler quel bioagresseur. Contrairement aux stratégies de lutte chimique, qui se caractérisent par l'homogénéité de leur mise en œuvre quel que soit le contexte agronomique et pédoclimatique, une expertise est donc requise pour adapter les modalités de diversification végétale aux contextes de production locaux. L'importance de l'objectif recherché par l'agriculteur est également soulignée, en particulier pour les rotations dont la conception peut répondre à des objectifs divers. Ainsi, une rotation conçue pour améliorer la fertilité du sol n'est pas nécessairement efficace pour réguler les bioagresseurs.

Outre la régulation naturelle des bioagresseurs, la diversification végétale est favorable à la biodiversité associée et rend d'autres services à la société

Deux méta-synthèses récentes agrégeant les résultats de milliers de travaux conduits dans le monde entier ont examiné les liens entre diversité végétale des espaces agricoles, biodiversité associée et fourniture d'un ensemble de services écosystémiques. Ces travaux comparent les niveaux de biodiversité et de services associés à différentes modalités de diversification, par rapport à des systèmes témoins peu diversifiés.

Ils identifient tout d'abord un lien positif entre la diversité végétale (qu'elle soit cultivée ou semi-naturelle) et la biodiversité associée, mais d'intensité variable selon les modalités de diversification. Les liens les plus forts sont observés dans les systèmes agroforestiers, alors qu'ils sont non significatifs pour les mélanges variétaux.

La vision des liens entre diversité cultivée et services écosystémiques est fragmentaire : certains services sont peu évalués (pollinisation, atténuation des émissions de gaz à effet de serre) et certaines modalités de diversification végétale restent peu étudiées sous l'angle de la fourniture de services (mélanges variétaux,

agroforesterie en zone tempérée, implantation de haies). Lorsque ces liens sont étudiés, ils s'avèrent majoritairement positifs. Leur intensité est toutefois, là encore, très variable selon les modalités de diversification considérées.

Globalement, les différentes modalités de diversification apparaissent plus ou moins intéressantes vis-à-vis de la préservation de la biodiversité et de la fourniture de services écosystémiques (Fig. 2). Les mélanges de variétés présentent des liens neutres avec la biodiversité et les services. A l'opposé, l'agroforesterie (telle que pratiquée en milieu tropical) est la plus intéressante vis-à-vis de ces enjeux. Les couverts d'interculture, les rotations, les haies et les cultures associées se positionnent de façon plutôt intermédiaire. Enfin, l'introduction de végétation semi-naturelle (hors haies) est associée à de plus hauts niveaux de biodiversité et de services écosystémiques que les systèmes peu diversifiés, mais on manque d'évaluations quantitatives pour positionner cette modalité de diversification végétale par rapport aux autres.

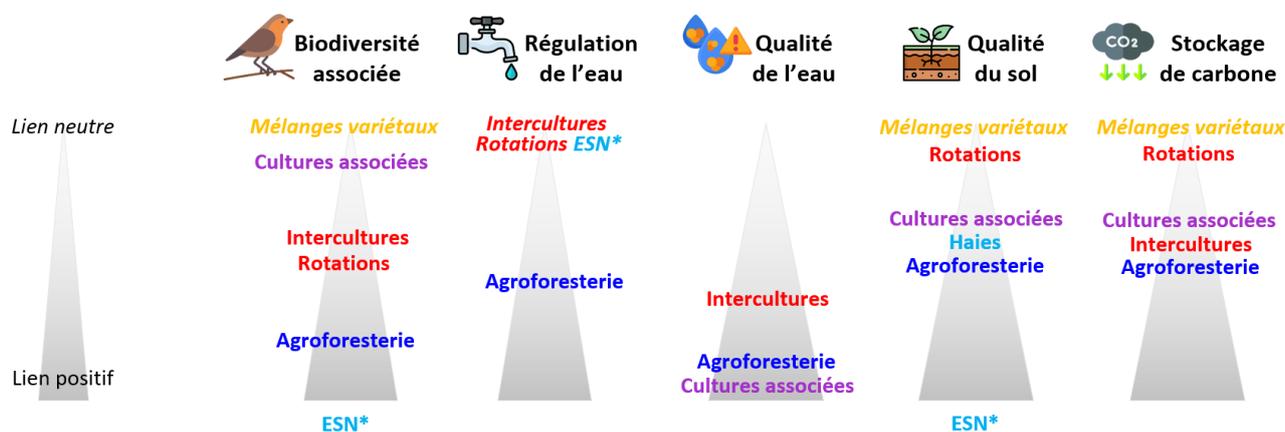


Figure 2. Hiérarchisation des modalités de diversification selon la force de leurs liens avec la biodiversité associée et la fourniture de certains services écosystémiques (seuls les liens renseignés dans la littérature sont représentés)

* Les liens positifs entre la diversité des éléments semi-naturel (ESN) et la biodiversité associée et les services écosystémiques ne sont pas quantifiés, empêchant de positionner cette modalité de diversification relativement aux autres.

Les systèmes diversifiés présentent des niveaux de rendement souvent supérieurs aux systèmes peu diversifiés

Le rendement dépend d'un ensemble de facteurs, dont les pertes causées par les bioagresseurs, mais aussi le potentiel génétique des plantes cultivées, la satisfaction des besoins nutritifs et hydriques de la culture, l'efficacité de la pollinisation, etc.

D'après la littérature analysée dans l'ESCo, la **diversification de la végétation cultivée s'accompagne généralement d'un gain du rendement** (en comparaison avec des systèmes moins diversifiés³). Ce gain est de l'ordre de quelques pourcents pour les **mélanges variétaux** et les **couverts d'interculture** en milieu tempéré, à plusieurs dizaines de pourcents en **agroforesterie** tropicale. Les **rotations** et les **cultures associées** présentent des gains de rendement intermédiaires. **La présence de végétation semi-naturelle ne semble quant à elle pas avoir d'impact sur le rendement de la parcelle adjacente**. A noter que les mélanges variétaux permettent une stabilisation inter-annuelle du rendement.

Ces ordres de grandeur, issus d'études réalisées dans le monde entier, sont en grande partie confirmés par les travaux analysant spécifiquement des systèmes diversifiés déployés dans des contextes agroécologiques et économiques comparables à la France. Certains cas d'études relatent cependant des baisses de rendement. On constate ainsi des rendements moindres associés à l'usage de **variétés traditionnelles ou paysannes** (raison pour laquelle elles ont historiquement été remplacées par des variétés certifiées issues de sélection variétale). Un manque de connaissances de l'agriculteur sur la conduite de systèmes diversifiés (par exemple dans le cas de l'**introduction d'une culture de niche dans la rotation** : chanvre, épeautre, etc.) peut également être à l'origine de fluctuations de rendement. Enfin, l'**introduction d'éléments semi-naturels** dans ou en pourtour de parcelle induit plutôt des pertes de production, essentiellement du fait de la perte de surface cultivée (si toutefois on ne tient pas compte de la valorisation possible de cette végétation : bois, fruits, etc.).

La diversification végétale a des effets contrastés sur la rentabilité économique de l'exploitation à court terme

La rentabilité des systèmes diversifiés est l'un des facteurs clefs de leur adoption, étant donné le poids de la dimension économique dans les choix des agriculteurs. **Peu de travaux évaluent les impacts économiques**, pour l'exploitation agricole, **de l'adoption de pratiques de diversification végétale pour protéger les cultures**. Cette évaluation est d'autant plus difficile à réaliser que les modalités de diversification étudiées affectent différemment les déterminants de la rentabilité (Fig. 3). De plus, la diversification végétale est souvent associée à d'autres pratiques agroécologiques, jouant elles aussi sur la rentabilité.

La modalité de diversification la plus étudiée est l'**association de cultures**, qui s'avère généralement **rentable** en dépit des surcoûts liés aux agroéquipements (pour le semis, la récolte et le tri notamment). L'adoption de **mélanges variétaux ne semble pas affecter significativement la rentabilité** de l'exploitation, mais peut stabiliser les revenus. Bien qu'associées à des rendements moindres, les **variétés traditionnelles ou paysannes** en grandes cultures peuvent s'avérer **rentables dans des stratégies de niche**, lorsque l'agriculteur contrôle la distribution de sa production en circuit court (*cf. infra*). La

³ Les rendements des mélanges de variétés ou d'espèces sont majoritairement comparés à des témoins non traités (approche expérimentale), contrairement aux autres modalités de diversification,

majoritairement comparées à des références en agriculture conventionnelle (approche observationnelle).

diversification des rotations et des assolements par l'introduction d'une nouvelle culture **donne en revanche des résultats très variables** (quelques effets positifs, parfois négatifs, souvent neutres). L'absence de rentabilité vient généralement du fait que les nouvelles cultures introduites

sont souvent, par définition, moins rentables que celles initialement choisies par l'agriculteur (car les plus rentables). De même, **l'implantation d'éléments semi-naturels n'est pas jugée rentable sans subventions**, du moins à court terme.

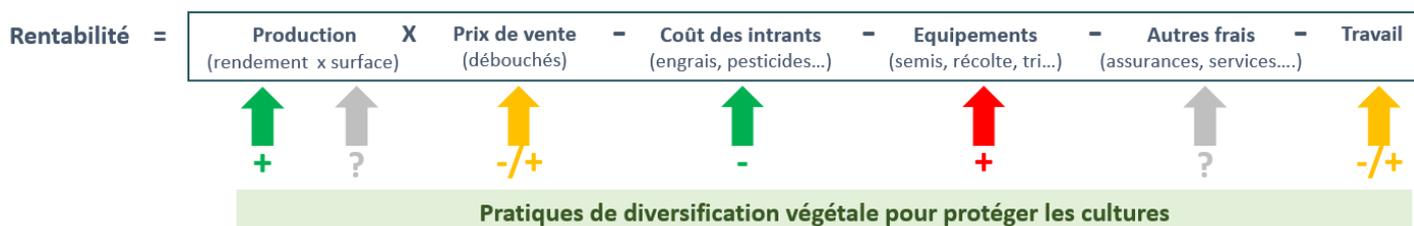


Figure 3. Représentation schématique des facteurs qui entrent dans le calcul de la rentabilité d'une exploitation agricole, et de la façon dont la diversification végétale d'un système de culture affecte la rentabilité

Les symboles traduisent l'effet de la diversification sur chaque composante : augmentation (+) ; diminution (-) ; effet ambigu (+/-) ; effet non documenté dans la littérature analysée (?). La couleur des flèches traduit le sens de l'effet sur la rentabilité : effet positif (vert) ; effet négatif (rouge) ; effet ambigu (jaune) ; information insuffisante (gris).

Par exemple : la diversification tend à favoriser le rendement (+) ce qui augmente la rentabilité (flèche verte), mais elle peut également augmenter le coût associé à certains équipements (+) ce qui amoindrit la rentabilité (flèche rouge).

De façon transversale, **les modalités de diversification végétale étudiées sont globalement plus performantes économiquement en contexte de forte pression de bioagresseurs ainsi qu'en systèmes à bas niveaux d'intrants, notamment en agriculture biologique**. La rentabilité économique est aussi renforcée dans des contextes économiques de prix de la production bas (ce qui atténue les effets d'une éventuelle perte de rendement) ou de coûts des intrants élevés (ce qui renforce les effets des économies d'intrants).

Toutefois, **les gains potentiels par rapport à un système de production conventionnel sont généralement insuffisants pour inciter l'agriculteur à affronter les verrous** liés à l'organisation sociotechnique des filières et aux interactions entre acteurs au sein des territoires (*cf. infra*).

D'un point de vue méthodologique, **l'estimation de la rentabilité des systèmes diversifiés souffre du manque de considération de divers facteurs** :

- le **décalage de mise en place des mécanismes écologiques** (pleinement effectifs après quelques années dans le cas de la diversification du paysage, des rotations et de la végétation semi-naturelle) et/ou la **pérennité des effets agroécologiques induits par la diversification végétale** (par exemple la stabilisation interannuelle du rendement) ;
- la **multiplicité des externalités positives de la diversification végétale**, qui s'expriment au-delà des frontières de l'exploitation agricole (la diversification mise en œuvre dans une exploitation peut contribuer à réguler les bioagresseurs à l'échelle du paysage), et ne se résument pas à la régulation des bioagresseurs (fourniture de certains services écosystémiques qui bénéficient à la société – *cf. supra*) ;
- se pose également la question de la **rentabilité « sociale »** des modes de production, intégrant dans son calcul les **impacts environnementaux et sanitaires des stratégies de protection des cultures basées sur la lutte chimique**.

Pour favoriser la diversification végétale, des verrous sont à lever au sein des filières agricoles et dans les territoires

Les modes de production qui prévalent dans les systèmes agricoles conventionnels dominants (fondés sur l'usage des intrants de synthèse) sont le résultat d'une coévolution des connaissances, des pratiques et des organisations au sein des filières durant les dernières décennies. Ces systèmes se sont spécialisés grâce à la réalisation d'économies d'échelle au niveau de l'exploitation (choix des cultures les plus rentables) et au sein des filières (concentration des efforts de Recherche & Développement et de conseil sur ces espèces, standardisation des modes de transformation agroalimentaires). Les politiques publiques productivistes ont accompagné ce mouvement. **Le système actuel est donc**

caractérisé par un verrouillage systémique qui s'oppose à la diversification (Meynard *et al.*, 2013).

En conséquence, le déploiement de stratégies de protection des cultures reposant sur la diversification végétale appelle des changements systémiques à la fois en amont et en aval de la production agricole, ainsi que dans la relation entre l'agriculteur et les autres acteurs du territoire (Fig. 4). Les freins et leviers au déploiement de telles stratégies sont rarement spécifiques à une modalité de diversification en particulier. **La littérature ne permet cependant pas de hiérarchiser le poids de chacun d'entre eux dans l'adoption des différentes pratiques de diversification.**

Les facteurs d'adoption relevant de l'amont des filières

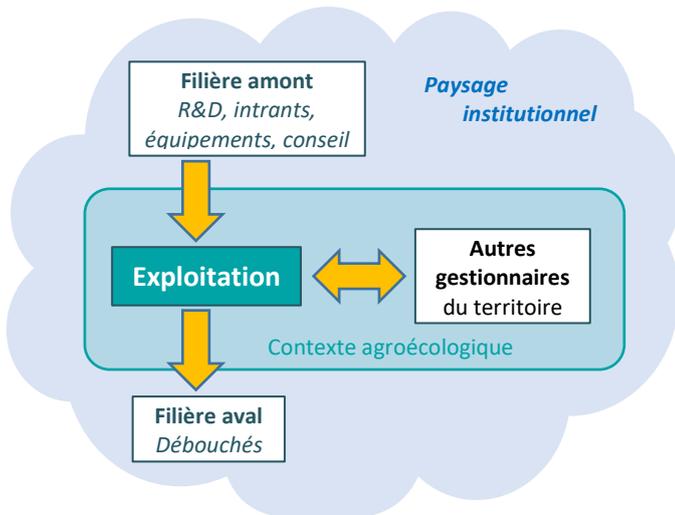


Figure 4. Les différents niveaux d'organisation socio-économiques considérés dans l'ESCo

En amont de l'exploitation agricole, la **disponibilité en semences et en plants adaptés aux systèmes diversifiés** est l'un des facteurs les plus fréquemment évoqués dans la littérature. Les variétés à disposition des agriculteurs sont majoritairement sélectionnées pour leur performance en culture pure conduite avec des intrants de synthèse. Outre le nécessaire **investissement dans l'effort de sélection**, le

Les facteurs d'adoption relevant de l'aval des filières

En aval, le **manque de débouchés pour les produits issus des systèmes diversifiés** est un verrou récurrent. Dans le cas des grandes cultures, les processus de transformation utilisés dans les filières standards imposent certaines caractéristiques (par exemple la pureté variétale pour la meunerie) qui ne peuvent être obtenues avec les **mélanges variétaux**, les **variétés traditionnelles ou paysannes** et les **associations de cultures**. Dans le cas du maraîchage et de l'arboriculture, les produits doivent satisfaire des standards stricts de qualité (calibre, apparence) et de volume à des dates de maturité données pour rentrer dans la grande distribution. Or la **diversification des cultures maraîchères** peut induire des défauts visuels sur les produits, et une modification des calendriers de culture.

Déployer la diversification végétale nécessite une coordination territoriale

Une coordination territoriale est nécessaire pour déployer la **diversification à l'échelle du paysage** (organisation spatiale des cultures, installation de trames de végétation semi-naturelle), ou pour garantir la **durabilité de certaines modalités de diversification mises en œuvre à l'échelle parcellaire** (pérenniser l'efficacité des mélanges variétaux nécessite de penser leur déploiement à l'échelle paysagère).

Des projets de diversification végétale mobilisant une pluralité d'acteurs (agriculteurs, conseillers agricoles,

partage d'expériences et l'échange de semences entre agriculteurs (possiblement associé à de la sélection participative impliquant chercheurs et agriculteurs) peuvent contribuer à lever ce frein.

L'**offre d'agroéquipements adaptés à des cultures diversifiées** fait également parfois défaut. C'est notamment le cas pour le semis et la récolte des **cultures associées** ou de certaines **cultures de niche**, et pour l'**entretien des éléments semi-naturels**. Le **partage des équipements** (achats groupés, recours à de la prestation de services) est cité comme un levier, qui impose toutefois une certaine coordination des utilisateurs. L'**auto-construction de matériel** par les agriculteurs (adaptation d'équipements) est aussi un levier pour faire diminuer le coût des équipements.

La littérature mentionne souvent un **manque de connaissances** (à la fois des agriculteurs et des conseillers), **de références technico-économiques et de conseil** pour la conduite des systèmes diversifiés. Outre **des investissements accrus dans la R&D et le conseil**, plusieurs leviers sont mentionnés dans lesquels la recherche a un rôle à jouer : **l'expérimentation à la ferme**, l'insertion dans un **réseau d'agriculteurs**, l'accès à des **outils d'aide à la décision et/ou d'évaluation des effets des pratiques de diversification** (notamment leur efficacité vis-à-vis des bioagresseurs).

Ces verrous peuvent être levés par la **valorisation des caractéristiques spécifiques des produits obtenues dans les systèmes diversifiés** (qualités organoleptiques, nutritionnelles ou environnementales, proximité, saisonnalité, etc.) dans des **filiales locales et/ou s'appuyant sur une labélisation**, permettant un prix de vente plus élevé. L'absence de débouché peut aussi être contournée par une **transition vers un modèle économique de transformation à la ferme** (par exemple farine pour les céréales, conserves pour les fruits et légumes), impliquant toutefois une charge de travail plus élevée. Dans le cas de l'**introduction d'éléments semi-naturels** au sein de l'exploitation, l'enjeu est de pouvoir valoriser le bois produit par les haies ou les rangées d'arbres des systèmes agroforestiers, dans des filières souvent méconnues des agriculteurs.

industriels agroalimentaires, coopératives, gestionnaires de l'eau, associations non agricoles, collectivités locales etc.) émergent mais restent rares. La littérature témoigne des difficultés méthodologiques à étudier et gérer le territoire, de par la multiplicité des échelles spatiales et temporelles à considérer et des acteurs impliqués. La **transdisciplinarité** est mise en avant pour dépasser ces difficultés, afin de **développer des recherches participatives avec les acteurs concernés**, et permettre ainsi l'émergence de solutions acceptables par tous.

Trois leviers sont identifiés pour favoriser les solutions territoriales :

- le fait que l'action collective génère un **gain collectif** (par exemple une écocertification ou des paiements pour services environnementaux) ;
- la **mise en place d'organisations collectives** pour gérer les territoires agricoles (par exemple des institutions

collectives locales comme des sociétés coopératives d'intérêt collectif) ou une planification et des incitations centralisées par la puissance publique ;

- la **certification des produits, fermes et paysages**, permettant plus de débouchés commerciaux (par exemple les marchés de restauration collective).

Les politiques publiques sont un déterminant clef du déploiement de la diversification végétale

Les politiques publiques, notamment la Politique agricole commune (PAC), ont été un levier fort pour initier et accompagner la modernisation de l'agriculture depuis l'après-guerre. **Sortir des verrouillages systémiques de ce modèle dominant très stable nécessite donc des politiques publiques ambitieuses**, ainsi qu'une évolution du cadre juridique régissant la gestion des espaces agricoles.

Si la PAC a progressivement introduit des mesures visant à réduire les impacts environnementaux et sanitaires de l'agriculture conventionnelle, le résultat effectif sur l'environnement et la biodiversité des espaces agricoles est peu visible. Le cas de **l'implantation d'éléments semi-naturels** en est un exemple emblématique. A partir du début des années 2000, les politiques publiques (en particulier européennes) ont cherché à favoriser leur conservation, puis leur restauration. Ainsi, les haies et l'agroforesterie sont aujourd'hui au cœur d'un nombre important de dispositifs européens (par exemple les BCAE⁴, paiements verts, MAEC⁵ et futurs écorégimes de la PAC) et nationaux (plan « France 2030 », stratégie d'accélération pour des systèmes et équipements agricoles durables, programmes financiers à l'initiative des régions, instauration localisée et expérimentale de paiements pour services environnementaux). **Si les mesures adoptées dans la PAC 2014-2020 sont apparues relativement efficaces pour éviter la destruction ou la dégradation des éléments semi-naturels en place, elles s'avèrent insuffisantes pour en favoriser l'expansion et n'ont pas stimulé le développement de l'agroforesterie.**

L'efficacité des dispositifs français n'est quant à elle pas évaluée, mais l'éparpillement des aides entre des mesures multiples apparaît insuffisamment incitatif. De plus, le contexte juridique n'est pas toujours en cohérence avec les incitations des politiques publiques. Ainsi, la réglementation est peu favorable au développement des éléments semi-naturels, qui se heurte au droit foncier rural. Des outils épars existent pour les protéger (bail rural, obligations réelles environnementales, documents d'urbanisme) mais aucune étude quantitative n'a mesuré le déploiement effectif de ce type de dispositif, ni son efficacité réelle. Enfin, l'agroforesterie est un objet juridique mal identifié, combinant deux activités (agricole et forestière) relevant de régimes juridiques distincts.

Plusieurs leviers politiques existent pour soutenir le recours à la diversification végétale plutôt qu'à la lutte chimique pour protéger les cultures. Les **subventions à l'adoption de pratiques de diversification** transfèrent vers la collectivité le fardeau économique que représente la prise en charge de la question environnementale par les agriculteurs. Les politiques publiques peuvent **soutenir directement les filières en ciblant le conseil, la recherche, l'aide à l'investissement et la mise en place de débouchés**. Ce soutien peut être adossé à la rémunération de services environnementaux justifiés par les effets de la diversification sur la biodiversité et la fourniture de services écosystémiques. Un tel soutien est généralement bien reçu par les acteurs au sein des filières et des territoires, mais se heurte à des contraintes budgétaires ainsi qu'à la complexité technique de sa mise en place (calcul et évaluation des bénéfices environnementaux).

Un **soutien indirect** peut quant à lui passer par une **correction des imperfections de marché qui favorisent actuellement les systèmes de production conventionnels** consommateurs d'intrants de synthèse, et en particulier de pesticides. Il peut s'agir notamment de **l'interdiction de l'usage des pesticides les plus toxiques, ou de leur taxation à hauteur des externalités négatives que leur usage génère**. Ce type de taxation environnementale induirait à la fois une réduction des usages et des mécanismes de substitution, tout en générant des revenus qui peuvent être utilisés pour accompagner le changement vers des pratiques plus vertueuses, par exemple. Compte-tenu de la faible élasticité de la demande par rapport au prix des pesticides, produire un effet nécessiterait une taxation forte (ou progressant rapidement dans le temps).

Il est encore trop tôt pour évaluer l'impact que pourrait avoir la PAC post 2023 sur la diversification végétale, et des travaux de recherche sont nécessaires pour évaluer l'effet de telles mesures. Il est cependant vraisemblable que, sans volonté politique forte définissant des objectifs engageants, les stratégies de protection des cultures alternatives à l'usage des pesticides, parmi lesquelles la diversification végétale, aient du mal à émerger d'elles-mêmes, et que les objectifs ambitieux fixés par le Pacte vert pour l'Europe ne soient pas atteints (Guyomard *et al.*, 2020).

⁴ Bonnes conditions agricoles et environnementales

⁵ Mesures agroenvironnementales et climatiques

En croisant l'ensemble des connaissances synthétisées, les modalités de diversification végétale peuvent être placées le long d'un gradient de transformation du système de culture que nécessite leur adoption, à mettre en regard de leurs bénéfices attendus :

- Les **mélanges de variétés** se heurtent à des verrous au niveau des filières (approvisionnement en semences, débouchés) mais semblent pouvoir être mis en œuvre dans les systèmes conventionnels sans changement majeur des pratiques de gestion ou du matériel agricole au niveau de l'exploitation. Cependant, leurs bénéfices associés en termes de régulation des bioagresseurs, de rendement et de fourniture de services écosystémiques sont également les plus faibles par rapport aux autres modalités de diversification.
- La **diversification des rotations** par introduction d'une nouvelle culture dans l'assolement de l'exploitation offre un potentiel intéressant pour la fourniture de services écosystémiques (dont la régulation naturelle des bioagresseurs) mais se heurte à des verrous tant au niveau de l'exploitation (complexité de conduite d'une nouvelle culture, besoin en équipement nouveau) qu'à celui des filières (manque de sélection variétale, de conseil et de recherche pour les cultures de niche, débouchés limités).
- Les **associations de cultures** de rente soulèvent des défis techniques (semis, récolte, tri), mais semblent parmi les plus rentables. Cette modalité de diversification exploite une combinaison de mécanismes (barrière à la dispersion, allélopathie, etc.) favorables à la gestion de plusieurs types de bioagresseurs (adventices, insectes, agents pathogènes du sol).
- A l'autre bout du gradient, les **systèmes agroforestiers** nécessitent les transformations les plus importantes : reconception plus fondamentale du système, utilisation de matériel agricole spécifique, insertion dans les débouchés sylvicoles, complexité du statut juridique. L'évaluation de la régulation des bioagresseurs par l'agroforesterie est à renforcer en milieux tempérés, mais les nombreux travaux portant sur l'agroforesterie (sub)tropicale démontrent les intérêts de ces couverts complexes en matière de préservation de la biodiversité et de fourniture d'une large gamme de services écosystémiques.
- L'**implantation d'éléments semi-naturels**, particulièrement bénéfiques à la biodiversité et à la fourniture de services écosystémiques, s'avère soulever des enjeux spécifiques à l'échelle du paysage. Elle impose notamment une coordination entre différentes catégories d'acteurs dans les territoires, et nécessite des politiques publiques incitatives spatialisées (par exemple pour mettre en place des trames vertes) complexes à concevoir et à mettre en œuvre.

Perspectives et besoins de recherches

La diversification végétale face aux enjeux environnementaux

Cette ESCo apporte des éléments de réflexion sur la contribution de la diversification végétale à la transition vers une agriculture sans pesticides de synthèse. Si l'adoption de pratiques de diversification s'accompagne souvent d'une réduction (non quantifiée) de l'usage des pesticides de synthèse, elle ne permet pas d'en garantir l'abandon, contrairement à des contraintes réglementaires telles que la certification Agriculture Biologique (AB). Dès lors, la combinaison de la diversification végétale (outil agroécologique) avec la certification AB (outil réglementaire) semble prometteuse. En effet, certaines modalités de diversification végétale (notamment concernant la végétation semi-naturelle des paysages) sont associées à de plus hauts niveaux de biodiversité et de services écosystémiques que les systèmes en AB non diversifiés. De plus, diversifier les systèmes permet souvent d'atteindre des rendements supérieurs à ceux de l'AB (ces gains de rendement étant d'ailleurs les plus marqués en systèmes bas intrants). La certification AB permet quant à elle d'améliorer la valorisation économique de la production des systèmes diversifiés.

Besoins de recherche

Outre les lacunes de connaissances identifiées dans le Tableau 1, on manque de travaux sur les effets de **combinaisons de modalités de diversification**, et/ou sur des **cortèges de bioagresseurs**. Anticiper ces effets nécessite de renforcer la compréhension des mécanismes qui sous-tendent les régulations naturelles. Concevoir des **expérimentations à l'échelle de territoires agroécologiques** est un moyen d'y parvenir, permettant en outre d'appréhender la

Par ailleurs, la **relation entre diversification végétale des espaces agricoles et changement climatique** est souvent mentionnée dans les éléments de discussion des articles analysés. Quelques travaux collectés dans le corpus font état des effets positifs des couverts d'interculture, des associations de cultures, de l'agroforesterie, des rotations diversifiées et des éléments linéaires implantés et/ou gérés par l'agriculteur (comme les bandes enherbées, les haies) sur le **stockage du carbone**, la **régulation de l'eau** et la **résilience vis-à-vis des perturbations climatiques**. Les mélanges de variétés, les associations de cultures et la présence d'éléments semi-naturels dans les paysages agricoles favorisent la **stabilisation des rendements vis-à-vis des variations des conditions climatiques annuelles**. Bien qu'une synthèse bibliographique exhaustive de cette littérature soit à engager, ces informations illustrent l'intérêt de la diversification végétale pour améliorer la résilience des systèmes agricoles et limiter la contribution de l'agriculture au changement climatique, sachant que l'agriculture est, selon le GIEC, le deuxième secteur contributeur au changement climatique après les transports.

dépendance des régulations naturelles aux conditions locales. De telles expérimentations sont également nécessaires pour évaluer la **durabilité** des régulations, ainsi que **l'évolution de leur efficacité** face au changement climatique et à l'érosion de la biodiversité. La place de l'élevage dans les systèmes de culture diversifiés est également à considérer (possible levier pour la diversification et débouché pour les productions végétales).

L'évaluation de la performance économique des systèmes diversifiés se heurte au manque de données obtenues en situation réelle sur les pratiques émergentes. L'étude des dynamiques de diffusion des innovations comme la diversification végétale reste un front de science majeur, qui souffre du manque de statistiques sur le développement de ces pratiques. Les impacts de l'adoption de ces pratiques sur la gestion de l'exploitation (notamment le travail) et sur l'usage des pesticides sont insuffisamment documentés. L'organisation collective de la protection des plantes à l'échelle des territoires est également très peu étudiée. Les expérimentations à large échelle décrites précédemment pourraient être un moyen de développer de nouveaux modes de coordination entre acteurs.

La faible efficacité des politiques publiques pour promouvoir l'adoption de la diversification végétale requiert des travaux sur la conception des politiques publiques agricoles et sur leur mise en cohérence avec les autres politiques sectorielles, notamment les politiques

alimentaires pour faire se rencontrer une offre de produits agricoles plus respectueux de l'environnement et des régimes alimentaires plus sains et durables. Des travaux sur les comportements des consommateurs doivent être entrepris (consentement à payer pour des attributs environnementaux dépassant la seule réduction des pesticides, acceptabilité vis-à-vis de produits ne répondant pas aux standards conventionnels).

Certains dispositifs semblent propices à de telles recherches intégrées et territoriales, mais doivent être multipliés et pérennisés. Les plateformes expérimentales INRAE et les zones ateliers en milieu agricole sont adaptées aux études de long terme. Les démarches d'innovation participative comme les *living lab* semblent répondre à l'approche systémique requise, et permettre la comparaison de larges gammes de systèmes diversifiés. En complément, le suivi spatialisé de l'adoption des pratiques de diversification peut s'appuyer sur la télédétection. La modélisation représente enfin une voie complémentaire de recherche à investir.

Jusqu'à quel point diversifier ? Quelques préconisations issues de la littérature scientifique

Quelques articles scientifiques⁵ fournissent des préconisations quantitatives sur le déploiement de certaines modalités de diversification végétale, sans toutefois cibler l'objectif de protection des cultures :

- **des mélanges variétaux composés de 4 à 5 variétés** pour réguler efficacement les maladies. À titre de comparaison, les mélanges variétaux de blé (qui représentent plus de 15 % de la sole française de blé) sont composés de 2 à 3 variétés maximum ;
- **des associations de 2 espèces non sensibles aux mêmes bioagresseurs et complémentaires dans leur utilisation des ressources** (par exemple céréale ou crucifère – légumineuse à graine) pour réguler les maladies, les adventices et les insectes ravageurs. Les mélanges de cultures de rente représentent aujourd'hui 0,1 à 3 % de la sole selon les régions, et sont principalement des associations céréales – protéagineux ;
- **des rotations supérieures à 3 ans en grandes cultures, incluant des cultures d'hiver et de printemps et, si possible, des Brassicacées** (pour réguler notamment les adventices) **et des légumineuses** (pour la fixation de l'azote atmosphérique). Actuellement, la majorité des surfaces en grandes cultures portent des rotations de 3 cultures maximum (avec une prédominance des triplets de cultures incluant le colza, le blé et l'orge) ;
- **une taille optimale de parcelle de grandes cultures d'environ 2,8 ha** pour favoriser la régulation et la biodiversité. Si la moyenne française se situe autour de 3,1 ha, 50 % de la SAU est occupée par des parcelles de plus de 6,8 ha ;
- **20 % d'éléments semi-naturels dans la surface des paysages** pour assurer les régulations d'arthropodes ravageurs, la conservation de la biodiversité et la fourniture de divers services écosystémiques ; **des linéaires de haies de l'ordre de 300 m par ha** pour concilier rendement et biodiversité. Du fait du manque de statistiques nationales, il est aujourd'hui difficile d'estimer la part qu'occupent les éléments semi-naturels dans les paysages agricoles français. Cette part est toutefois souvent inférieure à 5 % dans les plaines céréalières, et la dynamique de diminution des éléments semi-naturels initiée après-guerre se poursuit encore pour les haies et alignements d'arbres qui perdent en moyenne 7 000 km par an. L'agroforesterie n'occupait quant à elle que 100 000 à 170 000 ha au milieu des années 2010 selon les estimations, avec une dynamique de progression lente.

Références citées :

- Guyomard H., Bureau J.C. (coord.) *et al.* (2020). The Green Deal and the CAP: policy implications to adapt farming practices and to preserve the EU's natural resources. European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels. <https://bit.ly/35HmZJg>
- Leenhardt S., Mamy L., Pesce S., Sanchez W. (coord.) *et al.* (2022). Impacts des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques. Synthèse du rapport d'ESCO, INRAE - Ifremer (France). DOI : 10.17180/gfkj-e861
- Le Roux X. (coord.) *et al.* (2008). Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Synthèse du rapport d'ESCO, Inra (France).
- Meynard J.M., Messéan A. (coord.) *et al.* (2013). Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, Inra (France).

Pour en savoir plus

Vialatte A., Martinet V., Tibi A. (coord.) *et al.* (2022) Augmenter la diversité végétale des espaces agricoles pour favoriser la régulation naturelle des bioagresseurs et protéger les cultures. **Rapport scientifique d'ESCO – INRAE** (France).

Tibi A., Martinet V., Vialatte A. (coord.) *et al.* (2022). Augmenter la diversité végétale des espaces agricoles pour favoriser la régulation naturelle des bioagresseurs et protéger les cultures. **Synthèse du rapport d'ESCO – INRAE** (France).

Le rapport, la synthèse et le présent résumé sont mis en ligne sur le site internet d'INRAE.

⁵ Les références scientifiques sont citées dans la synthèse du rapport d'ESCO.



Centre-siège Paris Antony
Direction de l'expertise scientifique
collective, de la prospective et des études
147 rue de l'Université - 75338 Paris cedex 07
Tél. +33 1 (0)1 42 75 94 90

Rejoignez-nous sur :



inrae.fr

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE